



## انتخاب چسب بهینه برای اتصال جوش - چسب ورق‌های فولاد کم‌کربن St14 با استفاده از آزمون کشش برشی

سهراب احمدزاده<sup>۱</sup>، مصطفی حاجیان حیدری<sup>۲\*</sup>، سید وحید حسینی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: hajian@shahroodut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۳۰ دی ۱۴۰۳

پذیرش: ۸ فروردین ۱۴۰۴

#### کلیدواژگان:

اتصال جوش - چسب

فولاد کم‌کربن St14

آزمون کشش برشی

رسانندگی الکتریکی

بهینه‌سازی شرایط پخت

### چکیده

در این پژوهش، روش‌های انتخاب چسب برای اتصال‌های جوش - چسب ورق‌های فولاد کم‌کربن St14 با استفاده از آزمون کشش برشی بررسی شد. نمونه‌های اتصال با استفاده از جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی و اعمال انواع چسب‌های خام (اپوکسی، پلی‌اورتان و سیلیکون) و ترکیب آن‌ها ساخته شدند. تأثیر عوامل مختلف شامل نوع چسب، ترکیب با حلال، زمان و دمای پخت، و همچنین شرایط سطح اولیه بر استحکام اتصال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که چسب‌های ترکیبی حاوی تینر روغنی نسبت به سایر نمونه‌ها عملکرد بهتری داشتند. به ویژه، ترکیب ۴۰٪ وزنی چسب پلی‌اورتان، ۴۰٪ وزنی چسب سیلیکونی و ۲۰٪ وزنی تینر روغنی که در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه پخته شده بود، بهترین استحکام را ارائه کرد. همچنین مشخص شد که نظافت سطح اولیه تأثیر معناداری بر استحکام اتصال ندارد. در نهایت، بهینه‌سازی شرایط اتصال با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌های فاکتوریل انجام شد و نمونه‌ای با استحکام بهینه برای کاربردهای صنعتی معرفی گردید.

## Selection of optimum adhesive for weld-bond joining of St14 low carbon steel sheets using tensile shear test

Sohrab Ahmadzadeh<sup>1</sup>, Mostafa Hajian Heidary<sup>2\*</sup>, Seyed Vahid Hosseini<sup>1</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Faculty of Chemical and Materials Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

\* Corresponding Author's Email: hajian@shahroodut.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 19 January 2025

Accepted: 28 March 2025

#### Keywords:

Weld-Bonded Joint  
Low-Carbon St14 Steel  
Tensile Shear Test  
Electrical Conductivity  
Curing Condition Optimization

### Abstract

This study evaluated adhesive selection methods for weld-bonded joints of low-carbon St14 steel sheets using tensile shear tests. The joints were fabricated through resistance spot welding, combined with the application of various raw adhesives, including epoxy, polyurethane, and silicone, as well as their specific combinations. The effects of adhesive type, solvent combinations, curing time and temperature, and initial surface conditions on joint strength were thoroughly analyzed. Results showed that adhesive combinations containing oil-based thinner consistently performed better than others. Specifically, a mixture of 40 wt% polyurethane adhesive, 40 wt% silicone adhesive, and 20 wt% oil-based thinner, cured at 160°C for 60 minutes, demonstrated the highest strength among all samples tested. Additionally, it was observed that initial surface cleaning had no significant impact on the final joint strength. Optimization of joint conditions was performed using the Taguchi and factorial experimental design methods, producing a high-strength adhesive formulation well-suited for various industrial applications.

Please cite this article using:

Ahmadzadeh S, Hajian Heidary M, Hosseini SV. Selection of optimum adhesive for weld-bond joining of St14 low carbon steel sheets using tensile shear test. 2025 Apr 21;12(2):30-43. doi: 10.22034/ijme.2025.500689.2042 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

در بدنه خودروها حدود ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ عدد جوش نقطه‌ای مقاومتی وجود دارد [۱] که این اتصالات‌ها در اثر ارتعاشات ناشی از خرابی آسفالت جاده‌ها و نیروهای دینامیکی موتور، به مرور زمان در معرض خستگی قرار گرفته و در قسمت‌هایی که جوش ضعف دارد از هم گسیخته می‌شوند. در نتیجه این اتفاق، اولاً سروصدای آزاردهنده‌ای در حین حرکت و روشن بودن موتور به وجود می‌آید و ثانیاً، به علت عدم آب‌بندی جوش، اتصال در محیط مرطوب در معرض خوردگی قرار می‌گیرد. برای برطرف کردن این مشکل، علاوه بر بهبود روش‌های طراحی اتصال، راه‌حل‌های دیگری نیز پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده هم‌زمان از چسب (اتصال فیزیکی) و جوش (اتصال متالورژیکی) اشاره کرد که در مقالات و متون علمی از آن به اتصالات جوش - چسب<sup>۱</sup> نام برده می‌شود [۲]. در این روش، با انتخاب چسب مناسب و قرار دادن لایه نازکی از آن در بین ورق‌ها، عملیات جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی انجام می‌گیرد. چسب علاوه بر آب‌بندی نقطه جوش، باعث جذب ارتعاشات ناخواسته و افزایش اندک استحکام اتصال می‌گردد.

مطالعات مختلفی به بررسی ویژگی‌ها و تأثیرات اتصالات هیبریدی جوش و چسب بر عملکرد مکانیکی و خستگی ورق‌های فولادی و آلیاژی پرداخته‌اند. برخی پژوهش‌ها اثر جوش نقطه‌ای و چسب اپوکسی بر استحکام و خستگی برشی ورق‌های فولاد زنگ‌نزن و فیبر کربن را بررسی کرده و نشان داده‌اند که شدت جریان بهینه در این فرایند ۹۰۰۰ آمپر بوده است [۳-۵]. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر ریزساختار و خواص اتصالات منیزیم - فولاد تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی تحلیل شده و افزایش مقاومت خستگی منیزیم تأیید شده است [۶، ۷]. تحقیقات روی اتصالات آلومینیومی نشان داده‌اند که بهینه‌سازی متغیرهای سطح و پارامترهای جوش می‌تواند استحکام خستگی را بهبود بخشد. هرچند دما و رطوبت عملکرد این اتصالات را کاهش می‌دهد [۸-۱۱]. همچنین، تحلیل‌های اجزاء محدود، نتایج تجربی و مدل‌سازی‌ها همخوانی بالایی در پیش‌بینی استحکام خستگی این اتصالات داشته‌اند. مطالعات روی اتصالات هیبریدی فولاد استحکام بالا [۱۲-۱۵]، نقش کاهش خوردگی دکمه جوش<sup>۲</sup> و پراکندگی یکنواخت تنش را در افزایش مقاومت خستگی برجسته کرده است. در تحقیقات مربوط به آلیاژهای آلومینیوم 6082 و 6061، افزایش اندازه دکمه جوش با افزایش شدت جریان جوشکاری و تأثیر چسب اپوکسی در بهبود استحکام اتصال تأیید شده است [۱۶، ۱۷]. استفاده از چسب‌های پیشرفته مانند SikaPower-498<sup>®</sup> در ترکیب با جوش نقطه‌ای، منجر به افزایش جذب انرژی و مقاومت برشی شده است [۱۸، ۱۹]. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از چسب‌های خاص بدون نیاز به پخت<sup>۳</sup> یا ترکیب آن‌ها با ورق‌های ساندویچی فولادی باعث افزایش پایداری اتصال در شرایط دینامیکی می‌شود [۲۰، ۲۱]. بررسی‌های متالورژیکی اتصالات جوشی حاوی چسب تأیید کرده‌اند که این اتصالات در مقایسه با جوش یا چسب منفرد، استحکام بیشتری دارند [۲۲-۲۴]. پژوهش‌های دیگری نیز بر نقش پاک‌سازی سطح و کاهش ضخامت چسب در افزایش استحکام اتصال تأکید کرده‌اند [۲۵، ۲۶]. در شبیه‌سازی‌های عددی، توزیع تنش و استحکام اتصالات بررسی و مشخص شده است که لایه چسب فیلت<sup>۴</sup> نسبت به چسب با لبه‌های مربعی شکل تنش کمتری را تحمل می‌کند [۲۷-۲۹]. تحلیل‌های اجزاء محدود نشان داده‌اند که تمرکز تنش در مرزهای جوش به دلیل عدم تطابق ضخامت ورق‌ها افزایش می‌یابد [۳۰-۳۳]. علاوه بر این، تغییر در فاصله و قطر جوش یا تخلیه چسب از محل اتصال تأثیر بسزایی در کاهش وزن سازه و بهبود خواص مکانیکی دارد [۳۴، ۳۵]. بررسی‌های جدید نشان داده‌اند که استفاده از لایه چسب می‌تواند خواص مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای فولاد - آلومینیوم را بهبود بخشد. به طور مشخص، با افزایش عمق قفل‌شدگی مکانیکی، ظرفیت جذب انرژی و بار بیشینه قابل تحمل اتصال افزایش می‌یابد [۳۶، ۳۷]. همچنین، روش‌های بهبود عملکرد اتصالات چسبی، از جمله تغییرات سطحی، استفاده از نانوفیلرها و تغییر هندسه اتصال، تأثیر بسزایی بر استحکام و رفتار دینامیکی ساختارهای کامپوزیتی بزرگ مقیاس داشته‌اند [۳۸]. علاوه بر این، تحلیل تنش لوله‌های کامپوزیتی مدفون در خاک نیز نشان داده است که تغییرات دمایی و بارگذاری‌های مختلف تأثیر قابل توجهی بر تنش چسب دارند و چسب، حساس‌ترین مؤلفه در این نوع اتصالات محسوب می‌شود [۳۹].

بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که با وجود اهمیت بالای موضوع، تاکنون مطالعه جامع یا ویژه‌ای در زمینه اتصالات جوش - چسب در بدنه خودروهای داخلی که عمدتاً از ورق‌های فولادی کم کربن مانند St12، St14 و St37 ساخته می‌شود، با استفاده از چسب‌های موجود در بازار ایران انجام نشده است. این موضوع شکافی بین دانش و کاربردهای صنعتی ایجاد کرده است که این پژوهش

<sup>1</sup> Weld-Bonded Joints

<sup>2</sup> Nugget

<sup>3</sup> Curing

<sup>4</sup> Fillet

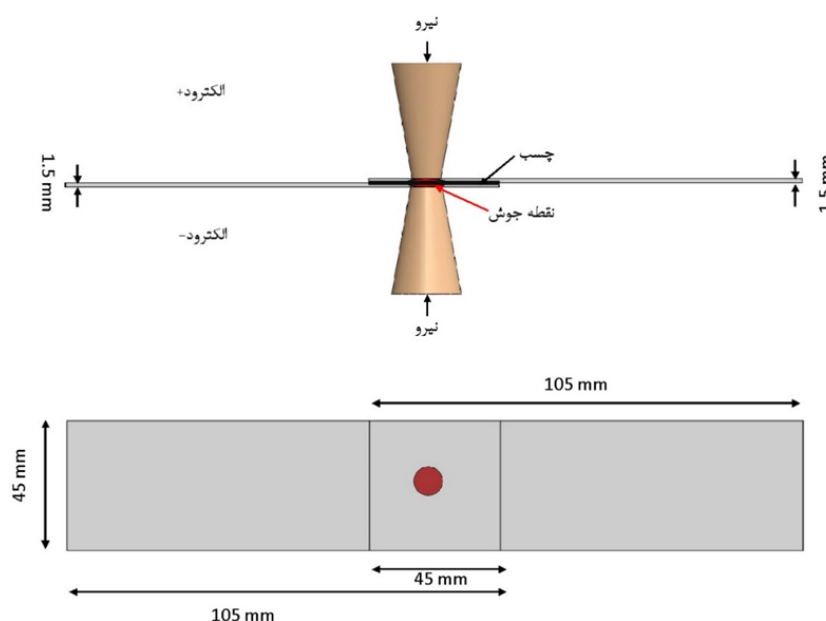
سعی در پرداختن به آن دارد. در این مقاله، برای اولین بار به بررسی رفتار تعدادی از چسب‌های اقتصادی رایج موجود در بازار ایران و همچنین روش‌های بهینه‌سازی آماده‌سازی آن‌ها برای انجام جوش نقطه‌ای مقاومتی پرداخته می‌شود. هدف این مقاله صرفاً انتخاب چسب مناسب بر مبنای آزمون کشش برشی<sup>۱</sup> است که از نتایج آن در مطالعات بعدی برای بهبود فرایند جوشکاری نقطه‌ای و افزایش استحکام اتصالات جوش - چسب استفاده خواهد شد. در این راستا، ترکیب و اختلاط چندین چسب مختلف با حلال‌های متفاوت و تأثیر آماده‌سازی سطح (شامل چربی‌زدایی و خشن‌کاری) بر بهبود چسبندگی، با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش بهینه‌سازی شده و نتایج آن‌ها به‌طور دقیق تحلیل گردیده است.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

ورق مورد استفاده در این پژوهش از نوع فولاد کم‌کربن St14 با ضخامت ۱٫۵ میلی‌متر بود که ترکیب شیمیایی آن با استفاده از آزمون طیف‌سنجی نشر نوری (کوانتومتری) تعیین و در جدول ۱ ارائه شده است. ورق‌ها به وسیله دستگاه برش گیوتین طبق استاندارد ISO 14273 به ابعاد ۱۰۵×۴۵ میلی‌متر بریده شدند. پس از آماده‌سازی ورق‌ها، چسب در محل همپوشانی‌شان مطابق شکل ۱ اعمال شد و اتصال‌ها با روش جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی به صورت لبه روی هم جوش داده شدند. جوشکاری با استفاده از الکترودهایی از جنس مس خالص تجاری (کلاس ۲) با قطر نوک ۴ میلی‌متر تحت شرایط شدت جریان ۱۴۰۰۰ آمپر، فشار ۱٫۲ بار و زمان ۱٫۵ ثانیه انجام گرفت.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد St14 مورد استفاده (بر حسب درصد وزنی)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
Base	۰/۰۴۷۳	۰/۰۱۵۶	۰/۱۹۱	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۳۹	۰/۰۲۱۴	۰/۰۲۱۵	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۴۱۲



شکل ۱ تصویر شماتیک اتصال

ویژگی‌های فنی و مشخصات چسب‌های خام اولیه مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. زمان گیرش اولیه چسب‌ها که یکی از عوامل اصلی در تعیین میزان کارایی آن‌ها است، در دمای اتاق اندازه‌گیری شده است. برای بهبود کیفیت و چسبندگی برخی از چسب‌ها، از سیلیکات سدیم محلول در آب به عنوان ماده اصلاح‌کننده استفاده شد که به دلیل ماهیت غیرآلی آن در جدول ۲ ذکر

<sup>۱</sup> Tensile Shear Test

نشده است. چسب‌ها به دو صورت خام و ترکیبی (حاصل از اختلاط چسب‌های خام با حلال‌ها) مورد استفاده قرار گرفتند. حلال‌های به کار رفته شامل اتانول، تینر روغنی و تینر فوری بود. مشخصات چسب‌های ترکیبی ساخته شده در جدول ۳ نشان داده شده است. چسب‌های ترکیبی پس از اعمال در محل اتصال و انجام جوشکاری، برای گیرش سریع‌تر قبل از آزمون کشش برشی، در خشک‌کن (آون) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸۵ دقیقه پخت شدند.

جدول ۲ مشخصات چسب‌های خام اولیه

نام تجاری	نوع	زمان گیرش	رنگ چسب
کاسپین	پلی اورتان	۱۲-۲۴ ساعت	مشکی
فاینال	پلی اورتان	۱۲-۲۴ ساعت	مشکی
مزدا	سیلیکون	۱۲-۲۴ ساعت	طوسی
زیپر تک‌جزئی	اپوکسی	۱۲-۲۴ ساعت	سفید
زیپر دو جزئی	اپوکسی	۱۰ دقیقه	بی‌رنگ

جدول ۳ مشخصات چسب‌های ترکیبی ساخته شده

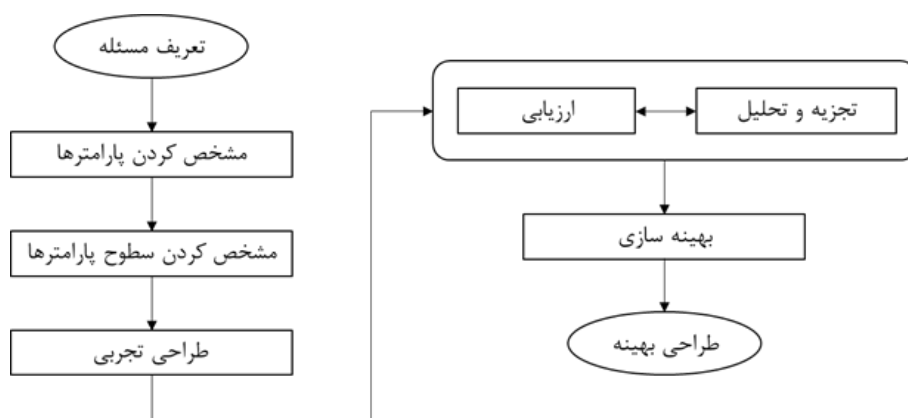
چسب ترکیبی فاینال و سیلیکات سدیم								
نمونه	حلال	وزن حلال	چسب ۱	وزن چسب ۱	چسب ۲	وزن چسب ۲	زمان پخت (min)	دمای پخت (°C)
۱	اتانول	%۱۸/۱۸	سیلیکات سدیم	%۱۸/۱۸	فاینال	%۶۳/۶۴	۸۵	۲۵
۲	اتانول	%۲۲/۲۱	سیلیکات سدیم	%۲۲/۲۳	فاینال	%۵۵/۵۶	۸۵	۲۵
چسب ترکیبی کاسپین و تک‌جزئی زیپر								
نمونه	حلال	وزن حلال	چسب ۱	وزن چسب ۱	چسب ۲	وزن چسب ۲	زمان پخت (min)	دمای پخت (°C)
۳	تینر ۲۰۰۰	%۱۴/۲۸	تک‌جزئی زیپر	%۴۲/۸۶	کاسپین	%۴۲/۸۶	۸۵	۱۴۰
چسب ترکیبی کاسپین و تک‌جزئی مزدا								
نمونه	حلال	وزن حلال	چسب ۱	وزن چسب ۱	چسب ۲	وزن چسب ۲	زمان پخت (min)	دمای پخت (°C)
۴	تینر روغنی	%۳۳/۳۲	تک‌جزئی مزدا	%۳۳/۳۴	کاسپین	%۳۳/۳۴	۸۵	۱۴۰
۵	تینر روغنی	%۲۰	تک‌جزئی مزدا	%۴۰	کاسپین	%۴۰	۸۵	۱۴۰
چسب ترکیبی کاسپین و تک‌جزئی مزدا و زیپر								
نمونه	حلال	وزن حلال	چسب ۱	وزن چسب ۱	چسب ۲	وزن چسب ۲	زمان پخت (min)	دمای پخت (°C)
۶	تینر روغنی	%۲۰	تک‌جزئی زیپر	%۳۲	تک‌جزئی مزدا و کاسپین	%۴۸	۸۵	۱۴۰
۷	تینر روغنی	%۲۰	تک‌جزئی زیپر	%۴۰	تک‌جزئی مزدا	%۴۰	۸۵	۱۴۰

برای ارزیابی بیشینه نیروی قابل تحمل، اتصال‌های جوش - چسب ایجاد شده تحت آزمون کشش برشی قرار گرفتند. روش انجام آزمون به این صورت بود که نمونه‌ها در دستگاه کشش یونیورسال (سنتام مدل STM-150) به گونه‌ای قرار داده می‌شدند که هر ورق در یکی از فک‌های دستگاه محکم شده و نیروی کششی در راستای محوری اعمال می‌شد. با توجه به چیدمان هم‌پوشانی ورق‌ها، بار اعمال شده باعث ایجاد تنش برشی در ناحیه اتصال می‌شود. از این رو به آن آزمون کشش برشی گفته می‌شود. این روش عمدتاً برای ارزیابی استحکام اتصالات چسبی و/یا جوش نقطه‌ای در صنایع مختلف به کار می‌رود. بارگذاری با نرخ ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تا لحظه شکست ادامه پیدا می‌کرد و در نهایت، نیروی شکست (مقاومت برشی اتصال) ثبت و تحلیل می‌شد. همچنین، یک نمونه جوش داده شده فاقد چسب نیز برای مقایسه تغییر اندازه نیروی تحمل شده تهیه شد (جدول ۴). سپس، بهترین چسب ترکیبی از نظر استحکام و زمان گیرش تعیین شد و به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی آزمایش‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۴ مشخصات جوش فاقد چسب

نمونه	شدت جریان (A)	فشار (bar)	زمان (s)
۸	۱۴۰۰۰	۱٫۲	۱٫۵

در نهایت، به کمک نرم‌افزار مینی‌تب<sup>۱</sup> و با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش تاگوچی<sup>۲</sup> و فاکتوریل<sup>۳</sup>، شرایط بهینه چسب از نظر مقدار و نوع حلال (تاگوچی) و کیفیت و نظافت سطح اولیه (فاکتوریل) تعیین شد. روش تاگوچی یک رویکرد قدرتمند در طراحی آزمایش است که به بهینه‌سازی فرایندها و محصولات از طریق کاهش واریانس و افزایش کیفیت کمک می‌کند. این روش مبتنی بر آرایه‌های متعامد<sup>۴</sup> و نسبت سیگنال به نویز است و امکان تجزیه و تحلیل تأثیر متغیرهای مختلف را با حداقل تعداد آزمایش فراهم می‌سازد. سیگنال‌ها متغیرهای مطلوبی هستند که باید بهینه شوند، و نویزها عواملی هستند که باعث تغییرپذیری و کاهش پایداری عملکرد سیستم می‌شوند. تاگوچی تمرکز ویژه‌ای بر مقاومت‌سازی طراحی دارد و با کاهش تأثیر عوامل نویزی، عملکرد بهتر محصول یا فرایند را در شرایط مختلف تضمین می‌کند. یکی از مزایای این روش، کاهش تعداد آزمایش‌ها از طریق استفاده از آرایه‌های متعامد است. این آرایه‌ها با روشی خاص از میان مجموعه آزمایش‌های روش فاکتوریل کامل انتخاب می‌شوند. از دیگر مزایای روش تاگوچی می‌توان به کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها، امکان بررسی عوامل گسسته مانند نوع و شرایط ماده، تعیین سهم و میزان اثر هر عامل، تخمین نتایج در شرایط بهینه و سطوح دلخواه، تعیین سهم خطا و تأثیرات متقابل در نظر گرفته شده، دستیابی هم‌زمان به شرایط بهینه برای چندین پاسخ، و امکان بررسی تعداد نامحدودی از عوامل در سطوح مختلف اشاره کرد [۴۰]. شکل ۲ الگوریتم بهینه‌سازی متغیرهای طراحی را با استفاده از روش تاگوچی برای بهبود ویژگی‌ها نشان می‌دهد. برای انجام این بهینه‌سازی، با توجه به تعداد عوامل و سطوح، آزمایش‌های لازم در نرم‌افزار مینی‌تب طراحی شده است. بدین ترتیب، مجموعه آزمایش‌های به دست آمده شامل تمام ترکیب‌های ممکن از عوامل و سطوح مربوطه است.



شکل ۲ الگوریتم بهینه‌سازی

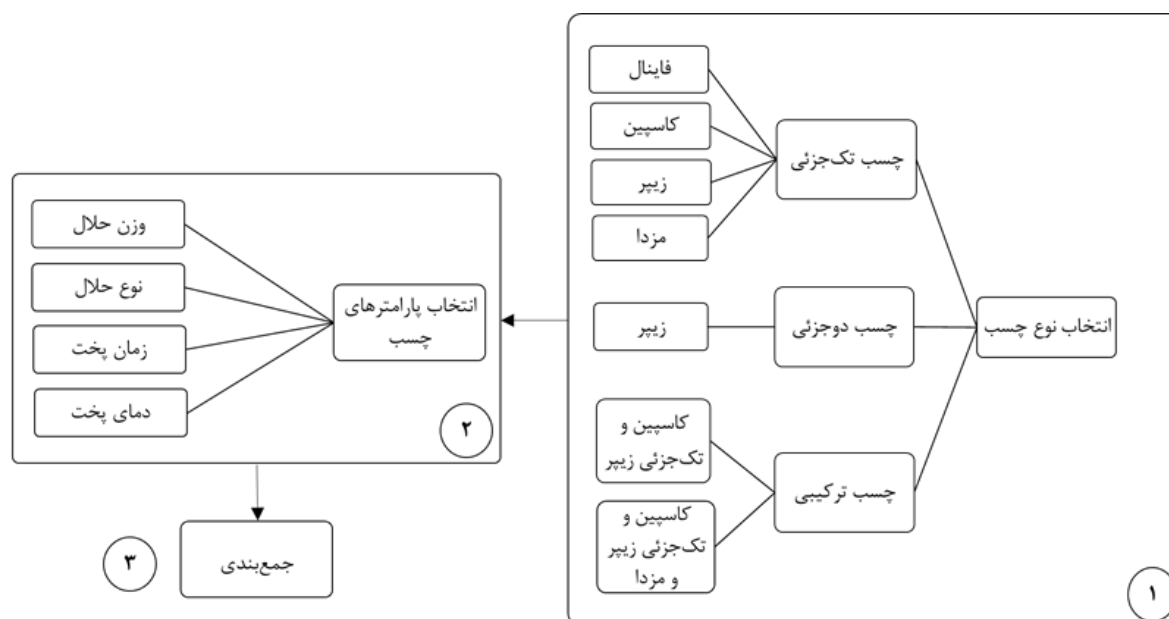
روش فاکتوریل نیز یکی دیگر از روش‌های طراحی آزمایش است که تأثیر هم‌زمان چندین متغیر را بر یک پاسخ بررسی می‌کند. در این روش، آزمایش‌ها برای تمام ترکیب‌های ممکن از سطوح عوامل اجرا می‌شوند و این امر به شناسایی تأثیرات اصلی و برهم‌کنش‌های میان متغیرها کمک می‌کند. روش فاکتوریل می‌تواند به صورت کامل (بررسی تمام ترکیبات) یا کسری (بررسی زیرمجموعه‌ای از ترکیبات) اجرا شود تا هزینه و زمان انجام آزمایش‌ها کاهش یابد [۴۱]. شکل ۳ نقشه راه فرایند تعیین شرایط بهینه چسب، شامل مقدار و نوع حلال (به روش تاگوچی) و همچنین کیفیت و نظافت سطح اولیه (به روش فاکتوریل) را نشان می‌دهد.

1 Minitab

2 Taguchi

3 Factorial

4 Orthogonal Arrays



شکل ۳ نقشه راه تحقیق

نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که چسب روی هر دو ورق باقی بماند و پهنای ورق به اندازه‌ای باشد که تأثیری بر استحکام چسب نداشته باشد. بر این اساس، پهنای ورق‌ها متناسب با ضخامت آن‌ها ۴۵ میلی‌متر انتخاب گردید (شکل ۱). برای محاسبه مقدار مناسب چسب در محل اتصال، از رابطه (۱) استفاده شد:






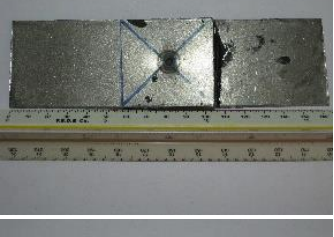

$$w = 1.35pt(a \times b) \quad (1)$$

که در آن  $a$  عرض همپوشانی (mm)،  $b$  طول همپوشانی (mm)،  $t$  ضخامت چسب (mm)،  $w$  وزن چسب (gr)،  $p$  وزن مخصوص چسب ( $\text{gr}/\text{mm}^3$ ) است. در این رابطه، ضریب ۱٫۳۵ به طور تجربی و از طریق آزمون و خطا تعیین گردید که در حقیقت برای جبران بیرون‌زدگی چسب هنگام قرارگیری بین ورق‌ها تحت فشار لحاظ شده است. علاوه بر این، آزمایش‌ها نشان دادند که مقدار بهینه حلال در چسب باید حدوداً ۲۰ تا ۲۵ درصد وزنی چسب باشد.

### ۳- نتایج و بحث

بررسی‌های اولیه نشان داد که چسب‌های خام به تنهایی قادر به تأمین رسانندگی الکتریکی لازم برای انتقال جریان بین دو الکترود نیستند. علاوه بر این، به دلیل گیرش اولیه ضعیف و شل بودن، چسب‌ها از محل اتصال خارج می‌شدند و برای استفاده به صورت تک‌جزئی مناسب نبودند؛ بنابراین، ترکیب چسب‌ها با انواع حلال‌ها مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳) تا رسانندگی الکتریکی افزایش یافته و جوش‌پذیری اتصال بهبود یابد. همچنین، مشاهده شد که برای انجام عملیات جوشکاری، چسب‌های ترکیبی حتماً باید در حالت خیس جوشکاری شوند و در صورتی که خشک شوند، رسانندگی الکتریکی خود را از دست می‌دهند. تصویر نمونه‌های جوش - چسب شده و نمونه جوش داده شده فاقد چسب در شکل ۴ نشان داده شده است.

شکل ۵ الف و ب به ترتیب نمودارهای نیرو - جابه‌جایی و بیشینه نیروی تحمل شده تا لحظه شکست را برای اتصالات جوش - چسب تهیه شده بر اساس جداول ۳ و ۴ نشان می‌دهد. در شکل ۵، اطلاعات مربوط به نمونه ۴ نشان داده نشده است زیرا در این نمونه عملاً هیچ جوشی شکل نگرفت و نمونه بدون نیاز به آزمون کشش برشی، با نیروی دست نیز قابل جدایش بود. از بین همه نمونه‌های کشیده شده، نمونه‌های شماره ۱ و ۲ با بیشینه نیروی ۷۴۷۷ نیوتن و ۷۲۰۹ نیوتن به ترتیب ضعیف‌ترین نتایج آزمون کشش برشی را از خود نشان دادند. این نتایج نشان‌دهنده کیفیت پایین جوش و بی‌تأثیر بودن افزودن سیلیکات سدیم بر چسبندگی چسب و تحمل نیروی برشی اتصال است. به طور کلی، چسب‌های ترکیبی که از ترکیب چسب تک‌جزئی فاینال (پلی اورتان) با سایر چسب‌ها به دست آمد، استحکام کمتری نسبت به سایر چسب‌های ترکیبی داشتند.

شکل ظاهری نمونه‌ها	نقطه جوش	پخت	حلال	چسب	نمونه
	✓	✓	✓	✓	۱
	✓	✓	✓	✓	۲
	✓	✓	✓	✓	۳
	✓	✓	✓	✓	۴
	✓	✓	✓	✓	۵
	✓	✓	✓	✓	۶
	✓	✓	✓	✓	۷



برای طراحی آزمایش‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد، اما دو محدودیت اصلی تعیین‌کننده امکان‌پذیری هر روش هستند: اول، تعداد نمونه‌های مورد نیاز و هزینه اجرای آزمایش‌ها؛ دوم، سطح اطلاعاتی که نتایج آزمایش‌ها ارائه می‌دهند. مسلماً هر چه تعداد آزمایش‌ها بیشتر باشد، نتایج قابل اعتمادتر خواهند بود، اما هزینه‌ها نیز افزایش می‌یابند. روش طراحی آزمایش‌ها (تاگوچی یکی از روش‌های بهینه‌سازی پرکاربرد در مهندسی کیفیت و بهبود فرایندها است. این روش با هدف کاهش هزینه‌ها، افزایش کیفیت و کاهش واریانس در فرایندهای تولید توسعه یافته است. رویکرد آن مبتنی بر بهینه‌سازی استفاده از منابع برای بهبود کیفیت بوده و از تابع هزینه<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری کیفیت استفاده می‌کند. این تابع نه تنها هزینه‌های آزمایش و تولید را کاهش می‌دهد، بلکه هزینه‌های اجتماعی ناشی از نقص کیفیت را نیز در نظر می‌گیرد. از ویژگی‌های مهم دیگر این روش می‌توان به تأکید بر کاهش واریانس و مقاومت‌سازی متغیرهای طراحی در برابر تغییرات اشاره کرد. در طراحی آزمایش‌ها (تاگوچی، عوامل کنترلی<sup>۲</sup> و عوامل ناخواسته<sup>۳</sup> به گونه‌ای شناسایی می‌شوند که تأثیر آن‌ها بر کیفیت نهایی محصول بررسی گردد [۴۰]. تحقیقات متعدد دیگری نیز برای بهینه‌سازی جوش نقطه‌ای از این روش استفاده کرده‌اند و با حداقل تعداد آزمایش به نتایج قابل توجهی دست یافته‌اند [۴۲-۴۴].

با توجه به تعداد زیاد متغیرهای طراحی، در این پژوهش نیز از روش تاگوچی برای تعیین مقدار و نوع حلال استفاده شد. این روش علاوه بر تحلیل نتایج، امکان حذف متغیرهای نویز و ارائه سیگنال‌های مؤثر را نیز فراهم می‌کند. در مرحله نخست، چهار عامل مستقل شامل وزن چسب، نوع حلال، زمان و دمای پخت در دو سطح (حداقل و حداکثر) بررسی شدند. استفاده از روش فاکتوریل کامل مستلزم انجام ۱۶ آزمون بود که از نظر اجرایی امکان‌پذیر نبود؛ بنابراین، روش L8 تاگوچی با ۸ آزمون به کار گرفته شد. سپس، چهار عامل مستقل دیگر مورد بررسی قرار گرفتند و طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش L12 تاگوچی انجام شد. برای انتخاب سطوح متغیرها، آزمون‌های اولیه انجام شد تا مقادیر حداقل و حداکثر قابل پیاده‌سازی تعیین شود. به عنوان مثال، چسب‌ها در کمتر از ۶۰ دقیقه پخت مناسبی نداشتند، ضمن اینکه پس از ۱۲۰ دقیقه نیز تغییرات قابل توجهی در رفتار چسب‌ها مشاهده نمی‌شد. همچنین، چسب‌ها در دمای حداقل ۱۲۰ سانتی‌گراد پایداری کافی داشتند، اما در دمای بالاتر از ۱۶۰ سانتی‌گراد دچار سوختگی می‌شدند؛ بنابراین، این مقادیر به عنوان حداقل و حداکثر زمان پخت در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که به دلیل محدودیت تعداد آزمایش‌ها در این پژوهش، تنها همین مقادیر بررسی شدند؛ اما در مطالعات آتی می‌توان تأثیر مقادیر خارج از این بازه را نیز مورد ارزیابی قرار داد.

وزن چسب، نوع حلال و شرایط پخت (زمان و دما) که توسط نرم‌افزار مینی‌تب و روش تاگوچی بهینه‌سازی شدند، در جدول ۵ ارائه شده است. شکل ۶ الف و ب به ترتیب نمودارهای نیرو - جابه‌جایی و بیشینه نیروی تحمل شده تا لحظه شکست را برای اتصالات چسبی تهیه شده نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که نسبت وزنی چسب به حلال، نوع حلال، دمای پخت و زمان پخت تأثیر قابل توجهی بر استحکام نهایی چسب دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو نوع حلال (اتانول و تینر روغنی)، بیشترین استحکام مربوط به چسب‌هایی است که بیشترین نسبت وزنی چسب به حلال را دارند. به طور مشخص، نمونه ۱۷ در میان چسب‌های حاوی اتانول و نمونه ۱۹ در میان چسب‌های حاوی تینر روغنی، بیشترین نسبت وزنی چسب به حلال را دارا هستند. افزایش این نسبت وزنی، صرف نظر از نوع حلال، به بهبود استحکام چسب منجر می‌شود. این پدیده را می‌توان به افزایش تراکم پلیمرهای تشکیل دهنده چسب و کاهش میزان حلال باقیمانده در ساختار آن نسبت داد. از سوی دیگر، حضور مقادیر بیشتر حلال در چسب، احتمال باقی ماندن رطوبت یا مواد فرار در ساختار آن را افزایش داده که این امر به تشکیل تخلخل‌هایی در چسب منجر شده و استحکام نهایی آن را کاهش می‌دهد.

در بررسی اثر نوع حلال بر استحکام چسب، نمونه‌های ۱۰ و ۱۸ مقایسه شدند و مشاهده شد که در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و زمان پخت ۶۰ دقیقه، تینر روغنی عملکرد بسیار بهتری دارد. این موضوع می‌تواند ناشی از تفاوت در ماهیت تبخیر حلال‌ها باشد. تینر روغنی، به عنوان یک حلال آلی، دارای نرخ تبخیر نسبتاً آهسته‌تری نسبت به اتانول است که این امر می‌تواند باعث ایجاد یک فیلم چسبی یکنواخت‌تر و کاهش تنش‌های داخلی در ساختار چسب شود. با این حال، افزایش زمان پخت به ۱۲۰ دقیقه در همین دما منجر به افزایش پراکندگی نتایج برای تینر روغنی و بهبود عملکرد اتانول شد. احتمالاً در زمان‌های طولانی‌تر، تبخیر تدریجی حلال تینر روغنی باعث تغییر در فرایند پلیمریزاسیون چسب شده و منجر به ناهمگنی در شبکه ساختاری آن می‌شود. در مقابل، اتانول که نرخ تبخیر بالاتری دارد، در همان مدت زمان باعث تشکیل یک ساختار چسبی منسجم‌تر شده و استحکام بهتری را فراهم کرده است.

<sup>1</sup> Loss Function

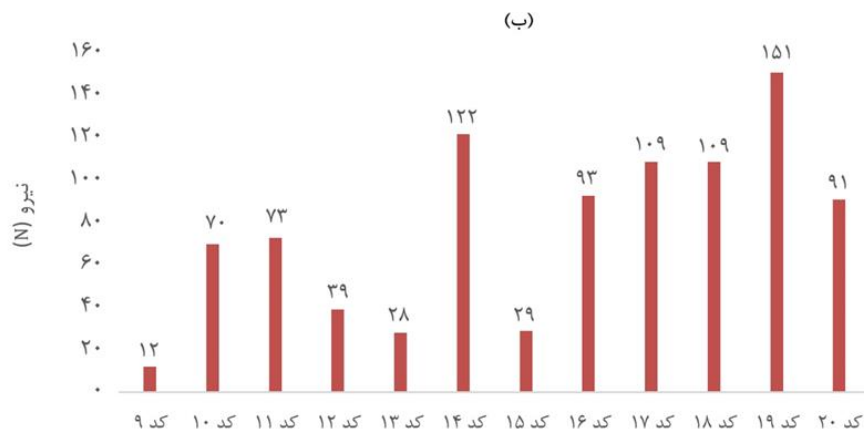
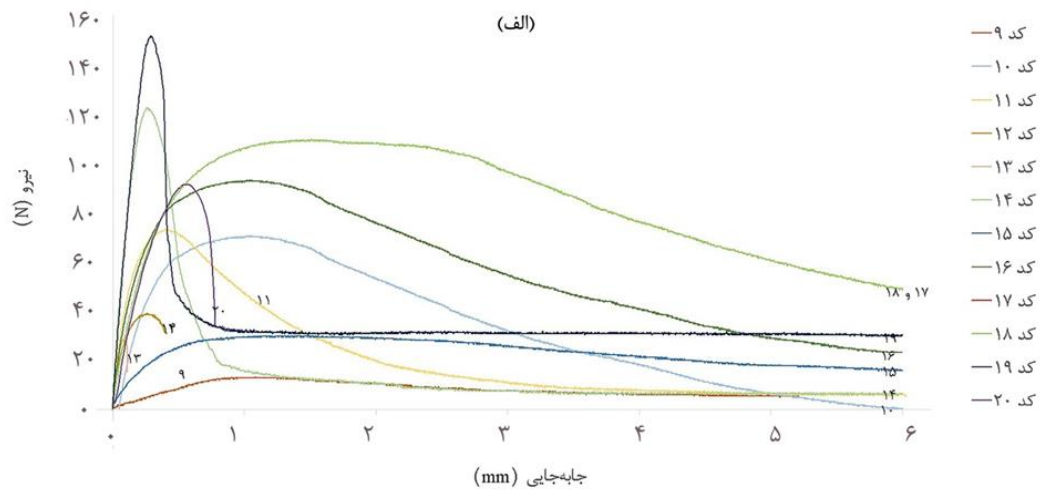
<sup>2</sup> Controlled Factors

<sup>3</sup> Noise Factors

جدول ۵ طراحی آزمایش با روش تاگوچی بر مبنای مشخصات چسب شماره ۵

نمونه	وزن چسب* (%)	نوع حلال	وزن حلال (%)	زمان پخت (min)	دمای پخت (°C)
۹	۷۵	اتانول	۲۵	۶۰	۱۲۰
۱۰	۸۰	اتانول	۲۰	۶۰	۱۲۰
۱۱	۷۲/۷۳	اتانول	۲۷/۲۷	۱۲۰	۱۶۰
۱۲	۸۰	تینر روغنی	۲۰	۱۲۰	۱۶۰
۱۳	۷۲/۷۳	تینر روغنی	۲۷/۲۷	۱۲۰	۱۲۰
۱۴	۷۲/۷۳	تینر روغنی	۲۷/۲۷	۶۰	۱۶۰
۱۵	۸۰	اتانول	۲۰	۶۰	۱۶۰
۱۶	۸۰	اتانول	۲۰	۱۲۰	۱۲۰
۱۷	۸۵/۷۲	اتانول	۱۴/۲۸	۱۲۰	۱۶۰
۱۸	۸۰	تینر روغنی	۲۰	۶۰	۱۲۰
۱۹	۸۵/۷۲	تینر روغنی	۱۴/۲۸	۶۰	۱۶۰
۲۰	۸۵/۷۲	تینر روغنی	۱۴/۲۸	۱۲۰	۱۲۰

\* ۴۰٪ وزنی چسب تک‌جزئی کاسپین (پلی اورتان) و ۴۰٪ وزنی چسب تک‌جزئی مزدا (سیلیکون)



شکل ۶ الف) نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه‌های ۹ تا ۲۰ ب) نمودار میله‌ای نیروی بیشینه تا لحظه شکست برای نمونه‌های ۹ تا ۲۰

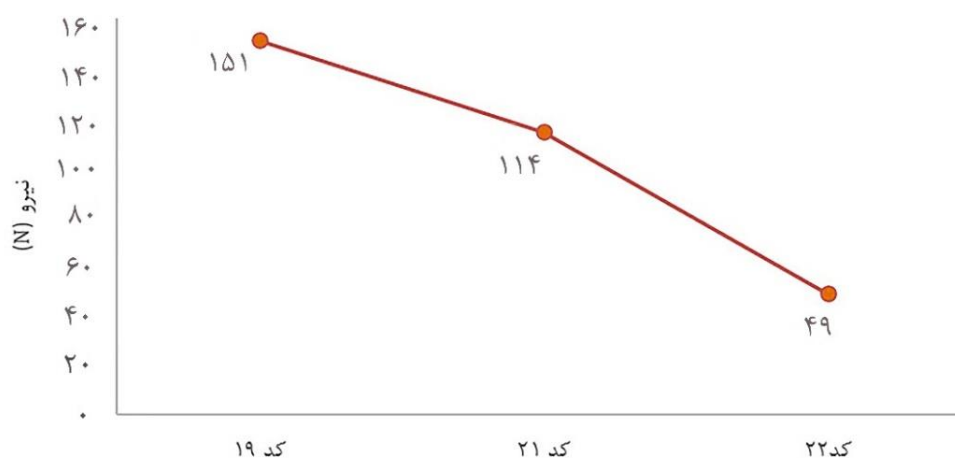
بررسی ترکیب اثر دما و زمان نشان می‌دهد که در شرایط ۶۰ دقیقه و هر دو دمای پخت (۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد) تینر روغنی بهترین عملکرد را دارد، درحالی‌که افزایش زمان پخت به ۱۲۰ دقیقه، منجر به بهبود استحکام نمونه‌های دارای اتانول می‌شود. این تغییر را می‌توان به تأثیر زمان بر نحوه توزیع و خروج حلال از ساختار چسب نسبت داد. در زمان‌های طولانی‌تر، احتمال به دام افتادن باقیمانده‌های حلال و ایجاد تخلخل‌های داخلی بیشتر می‌شود، که این موضوع ممکن است بر نتایج نمونه‌های دارای تینر روغنی اثر منفی بگذارد.

در مجموع، بهترین ترکیب برای دستیابی به بالاترین استحکام چسب، برای نمونه ۱۹ با نسبت بالای چسب به حلال و شرایط پخت ۶۰ دقیقه در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. این شرایط احتمالاً منجر به ایجاد یک ساختار بهینه از نظر پخت کامل، حذف کامل حلال و ایجاد یک شبکه پلیمری متراکم شده است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب نوع حلال و تنظیم دقیق پارامترهای فرایندی از جمله دما و زمان پخت، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب چسب دارد.

در پایان، تأثیر نظافت و کیفیت سطح اولیه بر استحکام اتصال چسبی بررسی شد. آزمایش‌ها براساس نمونه ۱۹ و با استفاده از روش فاکتوریل، برای سه روش نظافت شامل شستشو با آب جوش، خشن کاری با فرز و چربی‌زدایی با اتانول طراحی شدند (جدول ۶). نتایج آزمون کشش برشی کدهای ۱۹، ۲۱ و ۲۲ در شکل ۷ نشان داده شده است که به ترتیب مربوط به سطح بدون تمیزکاری، سطح شستشو شده با اتانول و سطح خشن کاری شده با فرز هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه ۲۱ با وجود استحکام نسبتاً مناسب، نیرویی کمتر از نمونه ۱۹ را تحمل کرد. نمونه‌های ۲۳ و ۲۴ به دلیل استحکام بسیار پایین که حتی با دست جدا می‌شدند، بدون انجام آزمون کنار گذاشته شدند. نتایج نشان داد که تمیزی سطح ورق‌ها تأثیر قابل توجهی بر نیروی بیشینه تحمل شده نداشته و چسب مورد استفاده حتی در شرایط وجود آلودگی نیز عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. این ویژگی به عنوان یک مزیت عملی محسوب می‌شود، زیرا نیاز به فرایندهای زمان‌بر و پرهزینه تمیزکاری سطح را کاهش داده و فرایند اتصال را ساده‌تر و مقرون به صرفه‌تر می‌کند.

جدول ۶ طراحی آزمایش با روش فاکتوریل

نمونه	شستشو با آب جوش	خشن کاری با فرز	نظافت با اتانول
۲۱	-	-	✓
۲۲	-	✓	-
۲۳	✓	-	-
۲۴	✓	✓	✓



شکل ۷ نمودار میله‌ای نیروی بیشینه تا لحظه شکست برای نمونه‌های ۱۹، ۲۱ و ۲۲

نکته قابل توجه اینکه در هیچ یک از آزمایش‌های انجام شده، پدیده پوسته پوسته شدن<sup>۱</sup> مشاهده نشد و شکست نمونه‌ها عمدتاً به صورت برشی رخ داد. پوسته پوسته شدن زمانی اتفاق می‌افتد که تنش‌های غیرمحوری یا عمود بر سطح چسبندگی باعث جدا شدن تدریجی چسب از زیرلایه شوند. در این نوع تخریب، تمرکز تنش شدیدی در لبه‌های ناحیه چسب‌کاری ایجاد شده و چسب به صورت لایه‌ای از سطح جدا می‌شود. این پدیده معمولاً در مواقعی رخ می‌دهد که چسب در برابر تنش‌های برشی مقاومت بالایی دارد اما نسبت به تنش‌های کششی عمود بر سطح چسبندگی حساس‌تر است.

عدم مشاهده این پدیده در نمونه‌های مورد بررسی را می‌توان به چند عامل نسبت داد. مهم‌ترین دلیل این است که استحکام چسب‌های بررسی شده به مراتب کمتر از استحکام ورق‌های فولادی مورد استفاده بوده است. به همین دلیل، چسب‌ها قبل از اینکه فرصت بروز تنش‌های پوسته پوسته را پیدا کنند، تحت تنش برشی تخریب شده‌اند. این نشان می‌دهد که مکانیسم شکست در این نمونه‌ها عمدتاً برشی بوده و جدایش لایه‌ای اتفاق نیفتاده است. علاوه بر این، شرایط بارگذاری در آزمایش‌های انجام شده به گونه‌ای بوده که نیروی اعمالی عمدتاً در راستای برشی وارد شده است. در آزمایش‌های کشش برشی، نیرو به صورت موازی با سطح چسبندگی اعمال می‌شود و تمرکز تنش در لبه‌های چسب کاهش می‌یابد. در حالی که برای مشاهده پدیده پوسته پوسته شدن معمولاً باید بارگذاری غیرمحوری یا خمشی وجود داشته باشد. از آنجایی که در این آزمایش‌ها چنین شرایطی فراهم نبوده، تنش پوسته پوسته شدن ایجاد نشده و چسب تحت بار برشی تخریب شده است. عامل دیگر، ضخامت و نوع چسب مورد استفاده است. برخی چسب‌ها، به ویژه چسب‌های نازک یا دارای مدول بالاتر، بیشتر مستعد شکست برشی هستند تا جدایش لایه‌ای. همچنین، در نمونه‌های بررسی شده هیچ عامل ثانویه‌ای مانند خمش یا تنش‌های غیرمحوری که منجر به ایجاد پوسته پوسته شدن شود، وجود نداشته است. این در حالی است که در شرایط سرویس واقعی، ارتعاشات، تغییر شکل‌های خمشی و سایر عوامل ممکن است منجر به جدایش لایه‌ای شوند، اما در آزمایش‌های انجام شده چنین شرایطی حاکم نبوده و شکست عمدتاً ناشی از تنش‌های برشی بوده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی و بهینه‌سازی متغیرهای چسب برای اتصال‌های جوش - چسب در ورق‌های فولادی کم کربن St14 با استفاده از چسب‌های اقتصادی رایج در بازار ایران پرداخته است. بر اساس نتایج به دست آمده، مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق به شرح زیر است:

- ترکیب ۴۰٪ وزنی چسب پلی اورتان کاسپین، ۴۰٪ وزنی چسب سیلیکون مزدا و ۲۰٪ وزنی تینر روغنی، بهترین عملکرد را از نظر استحکام اتصال ارائه داد.
  - افزودن تینر روغنی به ترکیب چسب، علاوه بر بهبود کیفیت اتصال، موجب افزایش رسانندگی الکتریکی شد که این موضوع می‌تواند تأثیر مثبتی در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای داشته باشد.
  - بررسی‌های انجام شده نشان داد که کیفیت اولیه سطح ورق‌ها تأثیر معناداری بر استحکام اتصال ندارد، که این امر نشان‌دهنده عملکرد مناسب چسب‌های انتخابی حتی در شرایط سطحی مختلف است.
- این نتایج می‌تواند راهنمایی ارزشمند برای بهبود طراحی اتصالات در صنایع خودروسازی و سایر صنایع مرتبط باشد، به ویژه در زمینه بهینه‌سازی روش‌های ترکیبی جوش - چسب جهت افزایش راندمان تولید. این یافته‌ها نشان می‌دهند که با انتخاب ترکیب و شرایط پخت مناسب، می‌توان استحکام و کیفیت اتصالات جوش - چسب را بهبود بخشید و از چسب‌های اقتصادی برای کاربردهای صنعتی بهره گرفت.

#### References

- [1] Brauser S, Pepke LA, Weber G, Rethmeier M. Deformation behaviour of spot-welded high strength steels for automotive applications. *Materials Science and Engineering: A*. 2010 Oct 15;527(26):7099-108. doi: 10.1016/j.msea.2010.07.091
- [2] Darwish SM, Ghanya A. Critical assessment of weld-bonded technologies. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000 Sep 29;105(3):221-9. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00592-6
- [3] Pouranvari M, Safikhani E. Mechanical properties of martensitic stainless steel weld/adhesive hybrid bonds. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018 Apr;23(3):227-33. doi: 10.1080/13621718.2017.1363453

<sup>1</sup> Peeling

- [4] Joesbury AM, Colegrove PA, Van Ryment P, Ayre DS, Ganguly S, Williams S. Weld-bonded stainless steel to carbon fibre-reinforced plastic joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018 Jan 1;251:241-50. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2017.08.023](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.023)
- [5] Goncalves VM, Martins PA. Static and fatigue performance of weld-bonded stainless steel joints. *Materials and Manufacturing Processes*. 2006 Dec 1;21(8):774-8. doi: [10.1080/03602550600728331](https://doi.org/10.1080/03602550600728331)
- [6] Xu W, Chen DL, Liu L, Mori H, Zhou Y. Microstructure and mechanical properties of weld-bonded and resistance spot welded magnesium-to-steel dissimilar joints. *Materials Science and Engineering: A*. 2012 Mar 1;537:11-24. doi: [10.1016/j.msea.2011.12.096](https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.096)
- [7] Manladan SM, Yusof F, Ramesh S, Fadzil M. A review on resistance spot welding of magnesium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016 Sep;86:1805-25. doi: [10.1007/s00170-015-8258-9](https://doi.org/10.1007/s00170-015-8258-9)
- [8] Khan MF, Sharma G, Dwivedi DK. Weld-bonding of 6061 aluminium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015 May;78:863-73. doi: [10.1007/s00170-014-6670-1](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6670-1)
- [9] Pereira AM, Ferreira JA, Antunes FV, Bártolo PJ. Assessment of the fatigue life of aluminium spot-welded and weld-bonded joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2014 Jul 18;28(14-15):1432-50. doi: [10.1080/01694243.2012.698107](https://doi.org/10.1080/01694243.2012.698107)
- [10] Sarpan ADB. A simulation study on GNP adhesive-bonded, resistance spot welded & weld-bonded joints [MSc thesis]. Kuala Lumpur: University of Kuala Lumpur; 2020.
- [11] Wang PC, Mabery P, Chisholm CK. Degradation of fatigue properties of weld-bonded aluminum exposed to moisture and elevated temperature. *The Journal of Adhesion*. 1993 Nov 1;43(1-2):121-37. doi: [10.1080/00218469308026592](https://doi.org/10.1080/00218469308026592)
- [12] Chang B, Shi Y, Lu L. Studies on the stress distribution and fatigue behavior of weld-bonded lap shear joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001 Jan 17;108(3):307-13. doi: [10.1016/S0924-0136\(00\)00842-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00842-6)
- [13] Fujii T, Tohgo K, Suzuki Y, Yamamoto T, Shimamura Y, Ojima Y. Fatigue properties of spot welded and spot weld-bonded joints of steel sheet. *Procedia Engineering*. 2011 Jan 1;10:1075-80. doi: [10.1016/j.proeng.2011.04.177](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.177)
- [14] Darwish SM, Ghanya A. Development of spot-weld bonded low carbon steel damping sheets. In *Current Advances in Mechanical Design and Production VII 2000* Jan 1 (pp. 477-488). Pergamon. doi: [10.1016/B978-008043711-8/50049-0](https://doi.org/10.1016/B978-008043711-8/50049-0)
- [15] Fujii T, Tohgo K, Suzuki Y, Yamamoto T, Shimamura Y. Fatigue strength and fatigue fracture mechanism of three-sheet spot weld-bonded joints under tensile-shear loading. *International journal of fatigue*. 2016 Jun 1;87:424-34. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2016.02.023](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.023)
- [16] Mandal AK, Chaudhary AK, Jain V, Meena ML, Sahu J, Jadoun RS. The effect of elastic modulus of adhesive on stress-distribution in weld bonded joint of Al 6082-T6 sheets. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;44:1999-2004. doi: [10.1016/j.matpr.2020.12.119](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.119)
- [17] Khan MF, Dwivedi DK, Sharma S. Development of response surface model for tensile shear strength of weld-bonds of aluminium alloy 6061 T651. *Materials & Design*. 2012 Feb 1;34:673-8. doi: [10.1016/j.matdes.2011.05.025](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.025)
- [18] Dang W. Finite element modelling of hybrid (spot welded/bonded) joints under service conditions [PhD dissertation]. Compiègne: Université de Technologie de Compiègne; 2015.
- [19] Dang WD, Jousset P, Rachik M. Weld-Bonded Joints Properties with Advanced High Strength Steel DP600. *Advanced Materials Research*. 2014 Jul 16;941:2066-73. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.2066](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.2066)
- [20] Sun X, Zhang Q, Wang S, Han X, Li Y, David SA. Effect of adhesive sealant on resistance spot welding of 301L stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Mar 1;51:62-72. doi: [10.1016/j.jmapro.2020.01.033](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.033)
- [21] Holtschke N, Jüttner S. Joining lightweight components by short-time resistance spot welding. *Welding in the World*. 2017 Mar;61:413-21. doi: [10.1007/s40194-016-0398-5](https://doi.org/10.1007/s40194-016-0398-5)
- [22] Shen J, Zhang YS, Lai XM, Wang PC. Adhesive placement in weld-bonding multiple stacks of steel sheets. *Welding Journal*. 2012 Feb 1;91(2):59-66.
- [23] Sam S, Shome M. Static and fatigue performance of weld bonded dual phase steel sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2010 Apr 1;15(3):242-7. doi: [10.1179/136217110X12665778348461](https://doi.org/10.1179/136217110X12665778348461)
- [24] Xu W, Liu L, Zhou Y, Mori H, Chen DL. Tensile and fatigue properties of weld-bonded and adhesive-bonded magnesium alloy joints. *Materials Science and Engineering: A*. 2013 Feb 15;563:125-32. doi: [10.1016/j.msea.2012.11.049](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.11.049)
- [25] Smith S, Vrenken J, van der Veldt T. Structural performance of adhesive and weld-bonded joints in AHSS. *Welding in the World*. 2013 Feb;57:147-56. doi: [10.1007/s40194-012-0006-2](https://doi.org/10.1007/s40194-012-0006-2)

- [26] Kah P, Suoranta R, Martikainen J, Magnus C. Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2014 Mar 1;36(2):152-64.
- [27] Chang B, Shi Y, Dong S. Comparative studies on stresses in weld-bonded, spot-welded and adhesive-bonded joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999 Mar 15;87(1-3):230-6. doi: [10.1016/S0924-0136\(98\)00355-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00355-0)
- [28] Al-Samhan A, Darwish SM. Strength prediction of weld-bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2003 Jan 1;23(1):23-8. doi: [10.1016/S0143-7496\(02\)00078-7](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(02)00078-7)
- [29] Al-Samhan A, Darwish SM. Finite element modeling of weld-bonded joints. *Journal of materials processing technology*. 2003 Dec 10;142(3):587-98. doi: [10.1016/S0924-0136\(02\)01015-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01015-4)
- [30] Zain NM, Roslin EN, Ahamat MA. Effectiveness of Warm Water Treatment on Weld Bonding Performances of 6061 Aluminium Alloy. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017;12(24):14677-86.
- [31] Messler RW. Weld-bonding: the best or worst of two processes?. *Industrial Robot: An International Journal*. 2002 Apr 1;29(2):138-48. doi: [10.1108/01439910210419150](https://doi.org/10.1108/01439910210419150)
- [32] Al-Bahkali E. The effect of adhesive thickness on spot weld-bonded joints of dissimilar materials using finite element model. *The International Journal of Multiphysics*. 2009 Dec 31;3(4):387-400. doi: [10.1260/1750-954.8.3.4.387](https://doi.org/10.1260/1750-954.8.3.4.387)
- [33] Darwish SM, Al-Samhan AM. Peel and shear strength of spot-welded and weld-bonded dissimilar thickness joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004 Mar 30;147(1):51-9. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2003.11.029](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.029)
- [34] Zhang S. Nonlinear Finite Element Analysis and Optimum Design of Spot-Welded Joints and Weld-Bonded Joints. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 2020 Sep 3;8(09):1715. doi: [10.4236/jamp.2020.89129](https://doi.org/10.4236/jamp.2020.89129)
- [35] Sakurai S, Ike Y, Yoshida K, Iyota M. Weldability and Mechanical Properties of Fe/Al Dissimilar Joints by Resistance Spot Weld Bonding. *Engineering Proceedings*. 2023 Oct 8;43(1):47. doi: [10.3390/engproc2023043047](https://doi.org/10.3390/engproc2023043047)
- [36] Queval J, Geslain E, Pouvreau C, Broussaud-Laloue P, Loyer S. Joining thin galvanized low carbon steel sheet to AA6056-T4 by resistance spot welding and adhesive weld bonding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024 Jan 31;110:70-81. doi: [10.1016/j.jmapro.2023.12.049](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.049)
- [37] Zhang H, Zhuang W, Shi J. Effect of the joining temperature on the tensile-shear mechanical properties of clinch-adhesive joints in steel and aluminum alloy sheets. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2025 Jun 1;140:103986. doi: [10.1016/j.ijadhadh.2025.103986](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.103986)
- [38] Karthikeyan N, Naveen J. Progress in adhesive-bonded composite joints: A comprehensive review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2024 Apr 27:07316844241248236. doi: [10.1177/07316844241248236](https://doi.org/10.1177/07316844241248236)
- [39] Shishesaz M, Yaghoubi S, Hussein Gatea A. Numerical analysis of stress distribution in the pressurized composite pipe buried in the soil. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2024 Oct 17;38(20):3825-41. doi: [10.1080/01694243.2024.2356917](https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2356917)
- [40] Ross PJ. Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. New York: McGraw-Hill; 1996.
- [41] Montgomery DC. Design and analysis of experiments. Hoboken: Wiley; 2020.
- [42] Lin HL, Chou T, Chou CP. Optimization of resistance spot welding process using Taguchi method and a neural network. *Experimental Techniques*. 2007 Sep 1;31(5):30-6. doi: [10.1111/j.1747-1567.2007.00186.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2007.00186.x)
- [43] Bhuyan P, Sahoo SS, Mahananda S, Bagal DK. Optimisation of resistance spot welding parameters using Taguchi's orthogonal array. *Materials Today: Proceedings*. 2024 Feb 1. doi: [10.1016/j.matpr.2024.01.052](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.01.052)
- [44] Soomro IA, Pedapati SR, Awang M, Soomro AA, Alam MA, Bhayo BA. Optimization and Modelling of Resistance Spot Welding Process Parameters for Quality Improvement Using Taguchi Method and Artificial Neural Network. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*. 2022 Dec 1;19(4). doi: [10.22068/ijmse.2709](https://doi.org/10.22068/ijmse.2709)