E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 12, Number 1, 2026



Investigation of the effect of explosive parameters on the interface, mechanical properties and corrosion behavior of heterogeneous joints of phosphor bronze and St37 steel using explosive welding process

E. Mohammadi, S. A. A. Akbari Mousavi*
School of Metallurgy and Materials Engineering, School of Engineering, University of Tehran, Iran.

Received 18 February 2026 ; Accepted 12 May 2026

Abstract

In this study, the metallurgical and mechanical properties of the interface obtained by explosive welding of 8-92 phosphor bronze to St37 carbon steel were investigated. The effects of explosive welding parameters such as explosive charge amount and stand-off distance on the shape and microstructure of the interface, mechanical properties and corrosion behavior were investigated. The results showed that with increasing stand-off distance and explosive charge amount, the velocity and angle of impact increased, and this phenomenon led to the interface transforming from a smooth to a wavy state and resulting in melted and separated regions. The results obtained from scanning electron microscope (SEM) images showed that with increasing stand-off distance and explosive charge amount and consequently increasing impact velocity, the length and height of the waves created at the interface increased. Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) analysis showed that no intermetallic compounds were formed at the joint interface. The results of the microhardness test also indicated that the hardness around the joint interface increased by 25% due to plastic deformation and work hardening caused by the intense impact of the base and flying plates. By performing shear strength tests, it was found that in all samples, failure occurred in the phosohor bronze layer and no failure occurred due to separation of the samples from the interface. By performing tensile tests, it was found that the ultimate tensile strength increased from 430 to 488 MPa with increasing stand-off distance and explosive load. Polarization acquisition and impedance spectroscopy (EIS) tests showed that with increasing impact energy, the corrosion potential decreased and the corrosion current density increased significantly from 5.5 to 13.2 $\mu A/cm^2$.

Keywords: Explosive welding, Stand-off distance, Explosive charge, Interface, Flyer plate.

*Corresponding Author: S. A. A. Akbari Mousavi, akbarimusavi@ut.ac.ir.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دوازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1405



بررسی تأثیر متغیرهای انفجاری بر فصل مشترک، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال غیرهمجنس فسفر برنز و فولاد St37 با استفاده از فرایند جوشکاری انفجاری

ابراهیم محمدی، سید علی اصغر اکبری موسوی *

دانشکده متالورژی و مواد دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران.

دریافت مقاله: 1404/11/29 ؛ پذیرش مقاله: 1404/02/22

چکیده

در این پژوهش به بررسی متالورژیکی و مکانیکی فصل مشترک حاصل از جوشکاری انفجاری فسفر برنز 8-92 به فولاد ساده کربنی St37 پرداخته شد. اثر متغیرهای جوشکاری انفجاری نظیر مقدار بار انفجاری و فاصله توقف بر شکل و ریزساختار فصل مشترک، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله توقف و مقدار بار انفجاری، سرعت و زاویه برخورد افزایش یافت و این پدیده منجر به تبدیل فصل مشترک از حالت صاف به موجی شده و مناطق ذوب و جدا شده حاصل گشت. نتایج به دست آمده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که با افزایش فاصله توقف و مقدار بار انفجاری و به تبع آن افزایش سرعت برخورد، طول و ارتفاع امواج ایجاد شده در فصل مشترک افزایش یافت. آنالیز طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS) و پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که هیچ ترکیب بین فلزی در فصل مشترک اتصال حاصل نشد. همچنین نتایج حاصل از آزمون ریزسختی سنجی بیان کرد که به دلیل تغییر شکل پلاستیک و کارسختی ایجاد شده حاصل از برخورد شدید صفحات پایه و پرنده، سختی در اطراف فصل مشترک اتصال تا 25 درصد افزایش یافت. با انجام آزمون استحکام برشی مشخص شد که در تمام نمونه‌ها، شکست در لایه فسفر برنزی اتفاق افتاده و هیچ شکستی به دلیل جدایش نمونه‌ها از فصل مشترک رخ نداد. با انجام آزمون کشش مشخص شد که استحکام نهایی کششی با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری از 430 به 488 مگاپاسکال رسید. آزمون‌های خوردگی پولاریزاسیون و طیف‌نگاری امپدانس (EIS) نشان داد که با افزایش انرژی برخورد، پتانسیل خوردگی کاهش و چگالی جریان خوردگی به طور چشمگیری از 5,5 به 13,2 میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع افزایش یافت.

کلمات کلیدی: جوشکاری انفجاری، فاصله توقف، مقدار بار انفجاری، فصل مشترک، صفحه پرنده.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: سید علی اصغر اکبری موسوی، akbarimusavi@ut.ac.ir.

1- مقدمه

جوشکاری انفجاری، یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که در اثر برخورد مورب و با سرعت بالای دو صفحه فلزی به یکدیگر و با استفاده از انرژی مواد منفجره انجام می‌شود. جوشکاری انفجاری عمدتاً برای تولید فلزات چند لایه به شکل ورق یا لوله به منظور بهبود خواص خوردگی و یا مقاومت به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

سایش و هدایت حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [1].
برای اینکه یک جوش انفجاری بی‌نقص و کامل اجرا شود، مهم است که تمام متغیرها و عوامل مؤثر در فرایند جوشکاری به درستی تعیین شوند. به دلیل قابلیت روش جوشکاری انفجاری در اتصال‌دهی فلزات غیرهمجنس، تحقیقات بر روی اتصال فلزات و آلیاژها نظیر اتصال‌دهی مس – آلومینیوم، مس – تیتانیوم، مس – فولاد زنگ نزن و تیتانیوم – فولاد زنگ نزن صورت پذیرفته و مشاهده شده است که متغیرهای جوشکاری نظیر فاصله توقف (فاصله اولیه ورق‌ها در هنگام آزمون) و بار انفجاری (نسبت وزن ماده منفجره به وزن صفحه پرنده) تأثیر مستقیمی بر مورفولوژی فصل‌مشترک و استحکام اتصال دارند [2-4].

در حین فرایند جوشکاری انفجاری، در اثر برخورد دو صفحه به یکدیگر، یک میدان خمیری موضعی و یک جت با سرعت بالا در فصل مشترک اتصال ایجاد شده که باعث ایجاد پیوند مکانیکی و متالورژیکی در این ناحیه می‌شود [5].
با توجه به کاربردهای فراوان کامپوزیت‌های فولاد و آلیاژهای مس در صنعت، اتصال انفجاری فولاد-مس به شدت مورد توجه قرار گرفته است. این اتصال‌ها ویژگی‌های خاصی مانند مقاومت در برابر خوردگی، رسانایی حرارتی و الکتریکی و شکل‌پذیری خوب در دماهای پایین را ارائه می‌دهند. اگر این خواص با هم ترکیب شوند، یک جزء منحصر به فرد ایجاد می‌کنند [6].
دورگوتلو و همکاران [7] به بررسی اثر فاصله توقف بر ویژگی‌های فصل مشترک اتصال مس و فولاد زنگ‌نزن پرداختند. نتایج تحقیق آنها بیان می‌کند که با افزایش فاصله توقف، فصل مشترک از حالت صاف به موجی شکل تبدیل شده و طول و دامنه امواج افزایش می‌یابد. همچنین سختی فصل مشترک اتصال با افزایش فاصله توقف افزایش یافت.
لیو و همکاران [8] اتصال انفجاری مس به فولاد زنگ نزن آستنیتی نیتروژن بالا را بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش نسبت انفجاری از 0,9 به 1,6 فصل مشترک از حالت مسطح به موجی شکل تبدیل شده و دامنه و طول موج فصل مشترک با افزایش مقدار بار انفجاری افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که مس در گردابه‌ها ذوب شده و ذرات پراکنده فولاد در فصل مشترک به درون مس وارد شدند.
در تحقیقی که سانگ‌جیانگ و همکاران [9] بر روی اتصال مس خالص به فولاد ساده کربنی انجام دادند دریافتند که جوشکاری انفجاری یک فصل مشترک موج مانند با نواحی گردابی را تشکیل می‌دهد. ناحیه گردابی در فصل مشترک از کریستال‌های فوق ریز و نانوکریستالی تشکیل شده که به طور قابل توجهی استحکام اتصال فصل مشترک را بهبود می‌بخشد.
محمدی و اکبری موسوی [10] در بررسی تاثیر ترکیب مواد منفجره بر فصل مشترک و خواص خوردگی اتصال مس به فولاد St52 دریافتند که با افزایش مقدار ماده منفجره با سرعت انفجاری بیشتر، فصل مشترک از حالت صاف به موجی تبدیل شده و سرعت خوردگی نیز افزایش یافت. آنها همچنین دریافتند با افزایش سرعت انفجار مواد منفجره، ضریب غیریکنواختی سطح و مقاومت در برابر خوردگی کاهش یافت که دلیل آن تغییر شکل پلاستیک شدیدتر و به دنبال آن انرژی برخورد بیشتر عنوان شد.
همچنین در پژوهشی که نیکبخت و همکاران [11] بر روی اتصال انفجاری ورق‌های آلومینیوم سری 5000 به مس انجام دادند مشخص شد که کمترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با بار انفجاری 1,5 و بیشترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با بار انفجاری 2,5 بود. به علاوه، نتایج آزمون متالوگرافی نمایانگر موجی-گردابه‌ای شدن فصل مشترک در اثر افزایش بار انفجاری بود.
خانزاده و همکاران [12] به ارزیابی تأثیر متغیرهای جوشکاری انفجاری بر رفتار خوردگی اتصال دو لایه فسفر برنز به فولاد کربنی در محیط نمک دریا پرداختند. منحنی‌های حاصل از آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان داد که کمترین نرخ خوردگی مربوط به نمونه با حداقل ضخامت بار انفجاری و بیشترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه با حداکثر فاصله توقف بود. بنابراین با توجه به اهمّیّت اتصال آلیاژهای مس به فولادها در صنایع مختلف و ایجاد موادی با قابلیت‌های

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

چندگانه، در پـژوهش حاضـر، تـأثیر همزمـان متغیرهـای بـار انفجاری و فاصله توقف بر ریزساختار فصل مشترک، خـواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال فسـفر برنـز بـه فـولاد St37 مورد بررسی قرار گرفت.

2- مواد و روش پژوهش

صفحه پایه مورد استفاده در این پژوهش از نوع فولاد ساده کربنی St37 با ابعاد 4×300×800 میلی‌متر بود. به عنوان صفحه پرنده نیز از آلیاژ فسفر برنز 8-92 با ابعاد 2×300×800 میلی‌متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی صفحات پایه و پرنده در جدول(1) و برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی آنها در جدول(2) آمده است.

جدول 1- ترکیب شیمیایی صفحات پایه و پرنده

عناصر (درصد وزنی)	عنصر پایه	روی	قلع	فسفر	منگنز	کربن
فسفر برنز	مس	0,026	7,74	0,165	<0,002	-
فولاد St37	آهن	-	-	<0,008	0,5	0,15

جدول2- خواص فیزیکی و مکانیکی صفحات پایه و پرنده

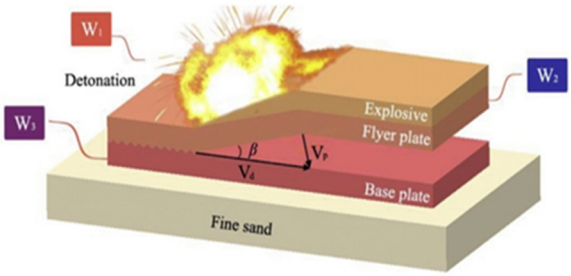
	چگالی (kg/m^3)	دمای ذوب (°C)	ظرفیت گرمای ویژه (j/kg.k)	مدول یانگ (GPa)	سختی (ویکرز)	ضریب پواسون
فسفر برنز	8800	970	380	110	131	0,34
فولاد St37	7850	1453	410	207	181	0,3

ماده منفجره استفاده شده، ترکیبی از ماده منفجره نیترات آمونیوم و پرلیت بود. برای اندازه‌گیری سرعت انفجار، از دو حسگر الکترونیکی که درون محفظه‌ای چوبی با فاصله مشخص قرار گرفته بودند استفاده شد. جدول(3) مشخصات آزمایش‌های انجام شده را به تفکیک نشان می‌دهد.

جدول3- مشخصات آزمایش‌های انجام شده

شماره نمونه	سرعت انفجاری D(m/s)	فاصله توقف S (mm)	نسبت بارگذاری انفجاری (R)	ضخامت مواد منفجره (mm)	سرعت برخورد (m/s)	زاویه برخورد (درجه)
1	2500	3	1,6	40	518	12
2	2500	2	1,8	45	488	11,2
3	2500	3	1,4	35	487	11,1
4	2500	2	1,6	40	463	10,6

برای انجام آزمایش‌ها از چینش موازی استفاده شد. صفحه فولادی به عنوان صفحه ساکن در پایین و روی بستر شنی قرار گرفت. صفحه پرنده فسفر برنزی با فاصله مشخص و موازی با صفحه ساکن قرار داده شد و مواد منفجره پس از آماده سازی و توزین داخل جعبه چوبی قرار گرفته و به طور کامل محصور گردید. شکل(1) طرحواره نحوه قرارگیری صفحات و تنظیم اولیه آزمایش جوش انفجاری را نشان می‌دهد.



شکل 1- نحوه قرارگیری صفحات و تنظیم اولیه جوشکاری انفجاری [13]

جهت انجام آزمون متالوگرافی از میکروسکوپ نوری مدل Cambridge S360 استفاده شد. هر یک از نمونه‌ها در وجه عمود بر جهت انفجار سنباده‌زنی و سپس توسط محلول آلومینا و خمیر الماسه پولیش شدند. عملیات حکاکی به وسیله محلول نایتال 2% انجام شد. برای مطالعه دقیق‌تر فازهایی که احتمال تشکیل آنها در نزدیکی فصل مشترک وجود دارد و همچنین شناسایی عناصر و درصد وزنی و اتمی هر عنصر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Cam-Scan MV2300 که مجهز به طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS) بود و از دستگاه شرکت Rigaku استفاده گردید.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

به منظور بررسی میزان تأثیر متغیرهای جوشکاری انفجاری بر میزان سختی فصل مشترک نمونه‌ها، آزمون ریزسختی‌سنجی به وسیله دستگاه Micro hardness buhler مطابق با استاندارد ASTM E384-11 [14] به روش سختی سنجی ویکرز انجام شد. جهت انجام آزمون، میزان بار 50g انتخاب و بر فصل مشترک و دو طرف آن با فواصل 50µm اعمال شد.

برای اندازه گیری استحکام فصل مشترک اتصال، نمونه‌ها تحت آزمون برش مطابق با استاندارد DIN 50162 [15] قرار گرفتند. ابتدا مساحت دقیق زائده اندازه‌گیری شده و پس از قرارگیری نمونه در قید و بند، فشار با نرخ 1 میلی متر بر دقیقه بر نمونه وارد گردید. تنش شکست بر اساس تقسیم بیشینه حد نیروی اعمال شده بر مساحت زائده گزارش می‌گردد. آزمون خمش سه نقطه بر اساس استاندارد ASTM A263-12 [16] توسط دستگاه یونیورسال (universal) با سرعت 12mm/min انجام شد. جهت بررسی رفتار کششی نمونه‌های جوش انفجاری شده، آزمون کشش تک محور در دمای محیط و با نرخ کرنش اولیه 1×10^{-3} s^{-1} انجام شد.به منظور بررسی رفتار خوردگی قطعات جوشکاری شده در محلول NaCl 3/5% از یک پیل الکتروشیمیایی سه الکترودی با ظرفیت 500mL برای آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. از الکترود کالومل فوق اشباع (SCE) به عنوان الکترود مرجع و الکترود پلاتین به منظور الکترود کمکی استفاده شد. آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ روبش 1mV/s از پتانسیل ابتدایی 250mV- پایین‌تر از پتانسیل مدار باز تا پتانسیل نهایی 250mV بالاتر از پتانسیل مدار باز جهت تعیین پتانسیل و جریان خوردگی انجام شد. آزمایش طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده بسامد 10mHz تا 100kHz و با دامنه 10mV حول پتانسیل مدار باز انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- رسم پنجره جوشکاری

پیش از انجام عملیات جوشکاری انفجاری، پنجره جوشکاری باتوجه به خواص فیزیکی و مکانیکی صفحات پایه و پرنده رسم شد. در ادامه بر اساس پنجره رسم شده، متغیرهای جوشکاری به گونه‌ای انتخاب شدند که در محدوده فصل مشترک موجی قرار گیرند. بر اساس منابع [17] برای حد پایین و بالای زاویه دینامیکی برخورد به ترتیب مقادیر 2 و 31 درجه در نظر گرفته شد. حد بالایی سرعت پیشروی نقطه برخورد (مرز سمت راست پنجره جوشکاری)، نشان دهنده حداکثر سرعتی است که تحت آن سرعت، اتصال انجام می‌شود. این مقدار به طور معمول 1/2 تا 1/5 برابر سرعت صوت در صفحات پایه و پرنده پیشنهاد می‌شود. برای حصول اطمینان از یک اتصال موفق، این سرعت 1/2 برابر سرعت صوت در صفحات پایه و پرنده انتخاب شد. در این صورت مطابق با رابطه1 داریم:

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$
$$C_{s,Bronze} = \sqrt{\frac{110\times10^9}{8800}} = 3535\ {}^{m}/_{s} \quad (1)$$
$$C_{s,Steel} = \sqrt{\frac{207\times10^9}{7850}} = 5135\ {}^{m}/_{s}$$

که در آن C_s سرعت صوت، E مدول الاستیک و ρ چگالی صفحات فلزی هستند. طبق رابطه2 حداقل سرعت پیشروی نقطه برخورد که بیانگر تغییر حالت فصل مشترک از حالت صاف به موجی است (مرز سمت چپ پنجره جوشکاری) به صورت زیر محاسبه شد:

$$V_w = \sqrt{\frac{2Re(H_f+H_b)}{(\rho_f+\rho_b)}} = \sqrt{\frac{2\times10.6\times(131+181)\times9.81\times10^6}{(8800+7850)}} = 1974\ {}^{m}/_{s} \quad (2)$$

که در آن V_w سرعت پیشروی نقطه برخورد، Re عدد رینولدز، H_b و H_f به ترتیب سختی صفحات پایه و پرنده و ρ_b و ρ_f به ترتیب چگالی صفحات پایه و پرنده هستند. به منظور تعیین حداقل سرعت برخورد جهت تشکیل جت (مرز پایین پنجره جوشکاری)، از رابطه3 استفاده شد. به دلیل آماده‌سازی نسبی سطوح پیش از انجام عملیات جوشکاری، مقدار k، 0/85 در نظر گرفته شد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

$$\sin(\beta)_{Br} = k\sqrt{\frac{H_v}{\rho V_w^2}} = 0.85 \times \sqrt{\frac{131 \times 9.81 \times 10^6}{8800 \times V_w^2}} = \frac{382.2}{V_w}$$
$$\sin(\beta)_{St} = k\sqrt{\frac{H_v}{\rho V_w^2}} = 0.85 \times \sqrt{\frac{181 \times 9.81 \times 10^6}{7850 \times V_w^2}} = \frac{475.6}{V_w} \quad (3)$$

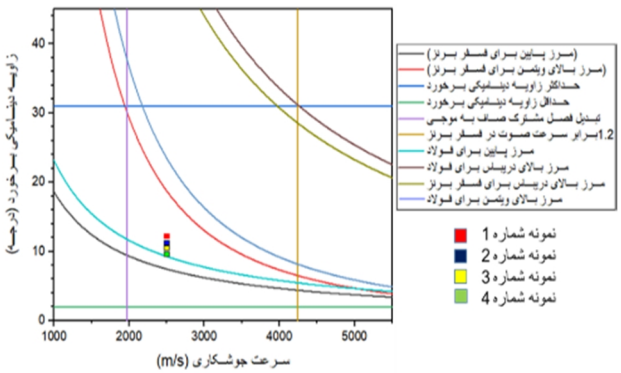
برای تعیین حد بالای ایجاد اتصال با فصل مشترک موجی و یا فصل مشترک موجی با گردابه های دارای ذوب موضعی، از دو رابطه ویتمن [18] و دریباس [19] جهت محاسبه مرز بالایی پنجره جوشکاری استفاده شد. رابطه پیشنهادی ویتمن، مرز بالایی را طوری تعیین نمود که در آن ذوب فصل مشترک اتفاق نیفتد، در حالی که مرز بالایی دریباس شرایطی را تعیین می‌کند که ذوب رخ می‌دهد. امّا زمان انجماد کمتر از زمان رسیدن موج برگشتی و در نتیجه گسیختگی اتصال می‌باشد. بنابراین، ناحیه بین این دو مرز می‌تواند نشان‌دهنده شرایط ایجاد اتصال به همراه فصل مشترک ذرات ذوب شده و یا ترکیبات بین‌فلزی باشد. با توجه به رابطه4 برای مرز بالایی بر اساس رابطه ویتمن داریم:

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)_{Br} = \frac{(T_m C_B)^{\frac{1}{2}}}{2NV_w^2}\left(\frac{KC_pC_B}{\rho t}\right)^{\frac{1}{4}} = \frac{1037162}{V_w^2}$$
$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)_{Br} = \frac{(T_m C_B)^{\frac{1}{2}}}{2NV_w^2}\left(\frac{KC_pC_B}{\rho t}\right)^{\frac{1}{4}} = \frac{1269400}{V_w^2} \quad (4)$$

در روابط بالا t ضخامت صفحه پرنده بر حسب (m)، ρ چگالی بر حسب (kg/m^3)، T_m دمای ذوب بر حسب (□)، C_p گرمای ویژه بر حسب (J/kg.k)، N ثابتی برابر با 0,062، V_w سرعت جوشکاری که در چیدمان موازی برابر سرعت انفجار ماده منفجره بر حسب (m/s)، C_B سرعت صوت بالک بر حسب (m/s) و K ضریب هدایت حرارتی ماده بر حسب (W/m.K) می‌باشند. همچنین برای مرز بالایی بر اساس رابطه دریباس (رابطه5) داریم:

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{k}{t^{0.25} \times V_w^{1.25}}$$
$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)_{Br} = \frac{1804}{0.002^{0.25} \times V_w^{1.25}} = \frac{8530}{V_w^{1.25}}$$
$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)_{St} = \frac{2343}{0.004^{0.25} \times V_w^{1.25}} = \frac{9316}{V_w^{1.25}} \quad (5)$$

شکل(2) پنجره جوشکاری محاسبه شده برای مواد اولیه و موقعیت جوشکاری‌های انجام شده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه صفحات پایه و پرنده غیرمشابه هستند، برای هر کدام از مرزهای سمت راست، بالا و پایین دو خط به دست می‌آید. برای حصول اطمینان از انجام اتصالی بدون عیب و باکیفیت، برای هر کدام از مرزهای ذکر شده، خطی که بیشترین ضریب ایمنی را داشته باشد در نظر گرفته شد. همانطور که از شکل(2) مشخص است، هر چهار نمونه در محدوده پنجره جوشکاری و فصل مشترک موجی قرار دارند. اینائو و همکاران [17] اشاره کردند که جوشکاری با کیفیت بالا در متغیرهای نزدیک به حد پایین پنجره جوش‌پذیری حاصل می‌شود. بنابراین طبق موقعیت آزمون‌های انجام شده در پنجره جوشکاری، انتظار می‌رود کیفیت و استحکام اتصالات ایجاد شده در حد مطلوب باشد.



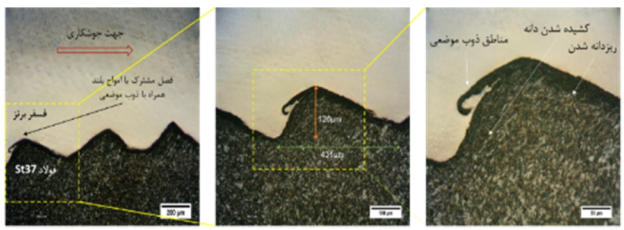
شکل 2- پنجره جوشکاری مربوط به آزمایش‌های انجام شده

3-2- بررسی ریزساختار فصل مشترک اتصال

شکل(3) ریزساختار فصل مشترک اتصال نمونه شماره 1 در سه بزرگنمایی مختلف را نشان می‌دهد. نمونه حاضر با فاصله توقف 3mm و نسبت بار انفجاری 1/6 جوشکاری شد. طبق جدول 3 نسبت بار انفجاری بالا و فاصله توقف بیشتر این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر، باعث افزایش سرعت صفحه پرنده در هنگام برخورد به صفحه پایه شده و در نتیجه انرژی برخورد در حالت بیشینه خود در بین این چهار نمونه قرار دارد. همانطور که در شکل(3) دیده می‌شود، هندسه فصل مشترک به صورت موجی همراه با گردابه است. فصل مشترک موجی مساحت پیوند واقعی را بزرگتر می‌کند و باعث می‌شود تا نقص‌های احتمالی در منطقه وسیع‌تری توزیع شوند. زمانی که صفحه پرنده به سمت صفحه پایه شتاب می‌گیرد، به دلیل

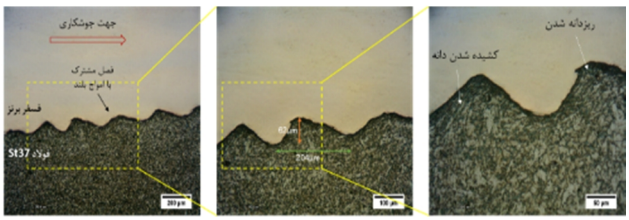
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

انفجار به وقوع پیوسته، فشار زیادی ایجاد شده (تا 10^4 مگا پاسکال) و سبب می‌شود فلز به صورت یک سیال با ویسکوزیته کم عمل کند. بنابراین صفحه پرنده به جت رو به داخل و رو به خارج تقسیم می‌شود. علاوه بر این، فشار زیاد حاصل از برخورد باعث تغییر شکل در صفحه پایه و ایجاد مانعی در این صفحه درست در جلوی نقطه برخورد می‌شود. در نهایت جت رو به خارج در زیر این مانع محبوس شده و با تکرار این فرایند، امواج در فصل مشترک اتصال تشکیل می‌شوند [18]. همچنین دانه‌های کشیده شده در اطراف فصل مشترک دیده می‌شوند که در جهت انفجار کشیده شده‌اند. دلیل تغییر شکل دانه‌ها در مجاورت فصل مشترک می‌تواند سرعت ضربه بالای ایجاد شده بر روی صفحات پایه و پرنده باشد. بیشتر بودن فاصله توقف و نسبت بار انفجاری باعث افزایش فشار برخورد و تغییر شکل پلاستیک در فصل مشترک اتصال می‌شود. این مسئله به دلیل افزایش مولفه مماسی سرعت برخورد صفحه پرنده و همچنین تنش‌های برشی ایجاد شده بین صفحات پایه و پرنده است. همچنین به دلیل ضربه ناشی از انفجار، دانه‌های ریز شده در اطراف فصل مشترک اتصال قابل مشاهده است. برخی از نویسندگان [20] توضیح می‌دهند که این ریز شدن دانه‌ها در فصل مشترک به دلیل تغییر شکل پلاستیک قابل توجه ناشی از شرایط سخت فرایند جوشکاری انفجاری، مانند فشار بالا و چرخه حرارتی منحصر به فرد آن است.



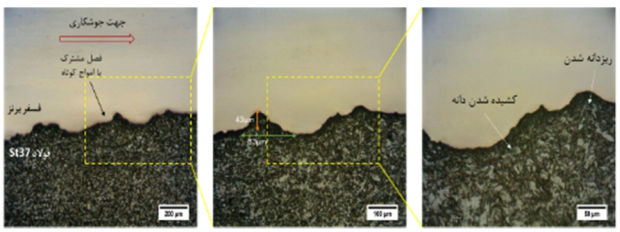
شکل 3- ریزساختار فصل مشترک اتصال نمونه شماره1

شکل(4) ریزساختار فصل مشترک اتصال نمونه شماره 2 را نشان می‌دهد که با فاصله توقف 2mm و نسبت بار انفجاری 1,8 جوشکاری شد. همانطور که در شکل(4) دیده می‌شود، هندسه فصل مشترک به صورت موجی با موج‌های بلند است. در مقایسه با دیگر هندسه‌های فصل مشترک مثل هندسه دارای لایه مذاب پیوسته یا هندسه صاف، هندسه موجی به دلیل سطح فصل مشترک بیشتر و در نتیجه استحکام بالاتر برای اتصال‌های جوشکاری انفجاری ترجیح داده می‌شود. در نمونه شماره 2 نسبت به نمونه شماره 1 با کاهش نسبی سرعت برخورد صفحه پرنده و زاویه برخورد، انرژی برخورد نیز کاهش یافته که باعث حذف مناطق گردابه‌ای از نوک امواج شده و ارتفاع و طول موج امواج ایجاد شده نیز کاهش یافت. دانه‌های تغییر شکل یافته و ریزدانه شدن در نزدیکی فصل مشترک اتصال در این نمونه هم مشاهده شد.



شکل 4- ریزساختار فصل مشترک اتصال نمونه شماره2

شکل(5) ریزساختار فصل مشترک اتصال نمونه شماره 3 را نشان می‌دهد که با فاصله توقف 3mm و نسبت بار انفجاری 1/4 جوشکاری شد. هندسه فصل مشترک در این نمونه به صورت موجی با موج‌های کوتاه است. در این نمونه با توجه به کاهش نسبت بار انفجاری تا 1/4، سرعت و زاویه برخورد کاهش محسوسی داشته که باعث کاهش انرژی برخورد و در نتیجه کاهش طول و ارتفاع امواج ایجاد شده در فصل مشترک شد. دانه‌های کشیده شده و پدیده ریزشدن دانه‌ها در مجاورت فصل مشترک در این نمونه هم مشاهده شد، هر چند که ضخامت لایه تغییر شکل یافته و مقدار کشیده شدن دانه‌ها کمتر از دو نمونه قبلی بود.

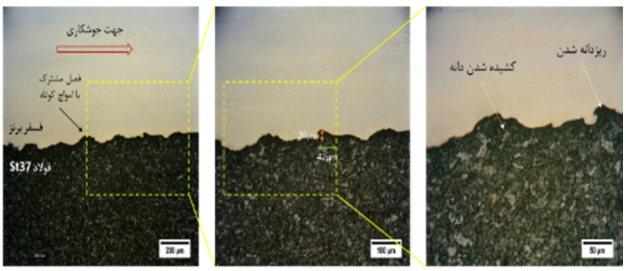


شکل 5- ریزساختار فصل مشترک اتصال نمونه شماره3

شکل(6) ریزساختار فصل مشترک اتصال نمونه شماره4 را نشان می‌دهد که با فاصله توقف 2mm و نسبت بار انفجاری 1,6

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

جوشکاری شد. هندسه فصل مشترک به صورت موجی با موج‌های کوتاه است. در این نمونه با توجه به کاهش فاصله توقف و نسبت بار انفجاری نسبت به نمونه‌های دیگر، مقادیر محاسبه شده برای سرعت برخورد صفحه پرنده و زاویه برخورد در حالت کمینه خود نسبت به سه نمونه دیگر قرار داشته که باعث کاهش انرژی جنبشی برخورد آن نسبت به تمام نمونه‌ها شده است. طول و ارتفاع امواج در این حالت در کمترین مقدار خود بوده و دانه‌های کشیده شده و ریزدانه شدن با ضخامتی کمتر از نمونه‌های دیگر قابل مشاهده است.



شکل 6- ریزساختار فصل مشترک اتصال نمونه شماره4

در نهایت با بررسی فصل مشترک اتصال در چهار نمونه ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله توقف در نسبت بار انفجاری ثابت و همچنین با افزایش نسبت بار انفجاری در فاصله توقف ثابت، سرعت برخورد صفحه پرنده به صفحه پایه، زاویه برخورد و انرژی جنبشی برخورد افزایش یافته که این پدیده منجر به تبدیل فصل مشترک از حالت موجی با امواج کوتاه و نزدیک به صاف، به فصل مشترک با امواج بلند و فصل مشترک موجی همراه با گردابه در نوک امواج شد. همچنین با کاهش انرژی جنبشی برخورد، میزان تغییر شکل پلاستیک در فصل مشترک اتصالات کاهش یافته و میزان کشیدگی و ریزشدن دانه‌ها کمتر شد. اگر میزان تغییر شکل پلاستیک در فصل مشترک اتصال کافی نباشد، امواج کوتاه تشکیل می‌شوند و ناحیه ذوب موضعی و ساختار گردابه‌ای ظاهر نمی‌شود. جدول(4) به اختصار شکل فصل مشترک‌های ایجاد شده بر اثر جوشکاری نمونه‌ها و همچنین میانگین طول و ارتفاع امواج ایجاد شده در فصل مشترک اتصال‌ها را بیان می‌کند. همانطور که از جدول(4) مشخص است، با افزایش بار انفجاری و فاصله توقف، طول و ارتفاع امواج تشکیل شده بیشتر شد. محققان دیگر [8] نیز در پژوهش خود به نتایج مشابهی رسیدند.

جدول4- مشخصات آزمون‌ها و فصل مشترک‌های حاصل از جوشکاری

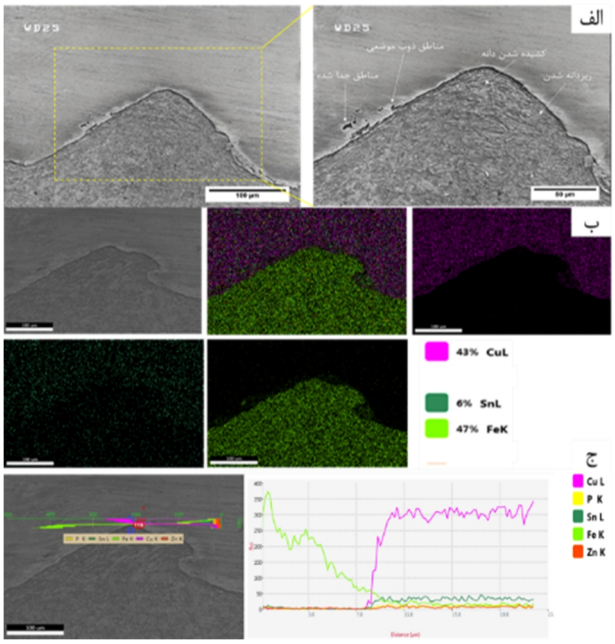
شماره نمونه	فاصله توقف (mm)	نسبت بار انفجاری (R)	سرعت برخورد (m/s)	زاویه دینامیکی برخورد (درجه)	شکل فصل مشترک	میانگین طول امواج (µm)	میانگین ارتفاع امواج (µm)
1	3	1,6	518	12	موجی همراه با گردابه	431	126
2	2	1,8	488	11,2	موجی با امواج بلند	204	62
3	3	1,4	487	11,1	موجی با امواج کوتاه	83	43
4	2	1,6	463	10,6	موجی با امواج کوتاه	42	26

شکل(7) نمایانگر تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، نقشه پراکندگی عناصر و آنالیز خطی نمونه شماره 1 است.

شکل(7-الف) نشان می‌دهد که مناطق ذوب موضعی محدودی فقط در سمت فولادی فصل مشترک ظاهر می‌شوند، در حالی که هیچ لایه ذوبی در سمت فسفر برنز مشاهده نمی‌شود. هدایت حرارتی بالای فسفر برنز نسبت به فولاد و توزیع گرمای حاصل از برخورد در مناطق اطراف فصل مشترک علّت این پدیده بود. دلیل به وجود آمدن مناطق جدا شده از زمینه فولادی و مناطق ذوب موضعی، چرخش و گیر افتادن جت جهنده در مجاورت امواج است. با افزایش ضخامت بار منفجره و فاصله توقف، انرژی جنبشی برخورد نیز افزایش یافته و سبب تشکیل مناطق ذوب موضعی در مجاورت امواج می‌شود. این مناطق توسط حرارت داخلی ایجاد شده بر اساس فشار بالای ناشی از امواج شوکی انفجار و تغییر شکل پلاستیک شدید و ایجاد گرمای آدیاباتیک (بی‌دررو) در اثر گیر افتادن گردابه در جلوی جبهه برخی از امواج در اثر استحاله انرژی جنبشی به انرژی حرارتی در طول برخورد و یا حرارت آدیاباتیک ناشی از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

گازهای حبس شده در بین صفحات می‌توانند ایجاد شده باشند. این مناطق موضعی با فلز سرد احاطه شده و تحت سرد شدن با سرعت بالا قرار دارند. در نتیجه احتمال تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در جوشکاری انفجاری قابل تصور است. اگر چه آهن و مس در حالت مذاب دارای حلالیت نامحدود هستند اما در حالت جامد، اختلاط‌پذیری متقابل بسیار کمی دارند و ترکیب بین‌فلزی تشکیل نمی‌دهند.

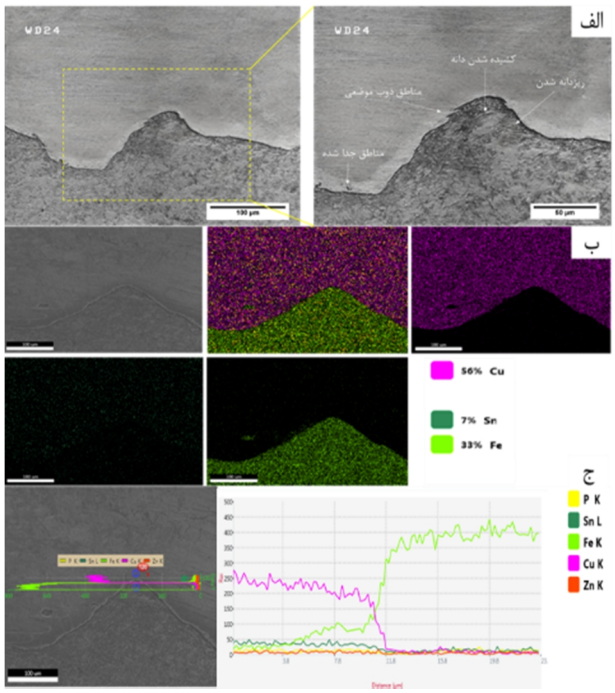


شکل 7- تصاویر الف) میکروسکوپی الکترونی روبشی ب) نقشه پراکندگی عناصر ج) آنالیز خطی نمونه شماره1

شکل(7-ب) نقشه پراکندگی توزیع عناصر در فصل مشترک اتصال نمونه شماره 1 را نشان می‌دهد که در آن، اختلاط جزئی مس و آهن در نواحی تاج موج‌ها و همچنین ذرات جدا شده فولاد در اثر جت حاصل از برخورد قابل مشاهده است. در شکل(7-ج) نیز آنالیز خطی فصل مشترک اتصال نمونه شماره 1 نمایش داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، با توجه به انرژی برخورد بیشتر این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها، شیب غلظتی نسبتاً ملایمی در فصل مشترک اتصال به وجود آمده که در اغلب موارد در فصل مشترک‌های با هندسه موجی قابل مشاهده است. هر چقدر هندسه فصل مشترک صاف‌تر باشد، شیب غلظتی نیز بیشتر خواهد شد.

در شکل(8-الف) فصل مشترک موجی همراه با موج‌های بلند، مناطق ریزدانه شده، کشیده شدن دانه‌ها و برخی ذرات جدا شده از زمینه فولادی در نمونه شماره 2 قابل مشاهده هستند. کشیدگی دانه‌ها در جهت انفجار به دلیل تغییر شکل پلاستیک ناشی از برخورد صفحات پایه و پرنده، یکی از پدیده‌های معمول در فصل مشترک اتصال انفجاری است که با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری که افزایش انرژی جنبشی برخورد را در پی دارند، هم میزان کشیدگی دانه‌ها و هم تعداد دانه‌های تغییر شکل یافته بیشتر می‌شود.

شکل(8-ب) نقشه پراکندگی توزیع عناصر و شکل(8-ج) آنالیز خطی فصل مشترک اتصال نمونه شماره 2 را نشان می‌دهند. در نمونه حاضر نیز مانند نمونه شماره 1، ذرات فولادی جدا شده از زمینه قابل مشاهده هستند. شیب غلظتی در نمونه شماره2 مطابق انتظار، با کاهش فاصله توقف و به دنبال آن کاهش انرژی جنبشی برخورد، تندتر از نمونه شماره1 بود.



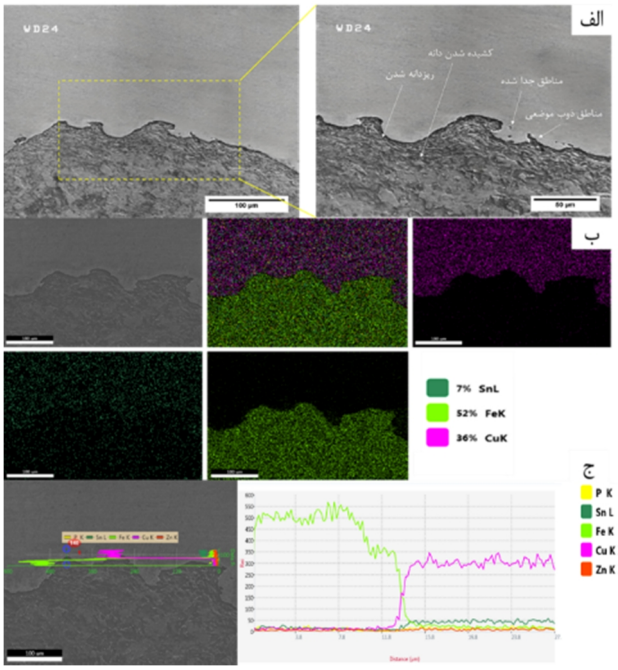
شکل 8- تصاویر الف) میکروسکوپی الکترونی روبشی ب) نقشه پراکندگی عناصر ج) آنالیز خطی نمونه شماره2

در شکل(9-الف) فصل مشترک موجی همراه با موج‌های کوتاه، مناطق ریزدانه شده، کشیده شدن دانه‌ها و برخی ذرات جدا شده از زمینه فولادی نمونه شماره 3 قابل مشاهده هستند. موج‌های

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

ناهمگون با ارتفاع و طول موج کمتر نسبت به نمونه‌های شماره 1 و 2 به دلیل بار انفجاری و فاصله توقف کمتر این نمونه و در نهایت انرژی جنبشی برخورد کمتر آن حاصل شد.

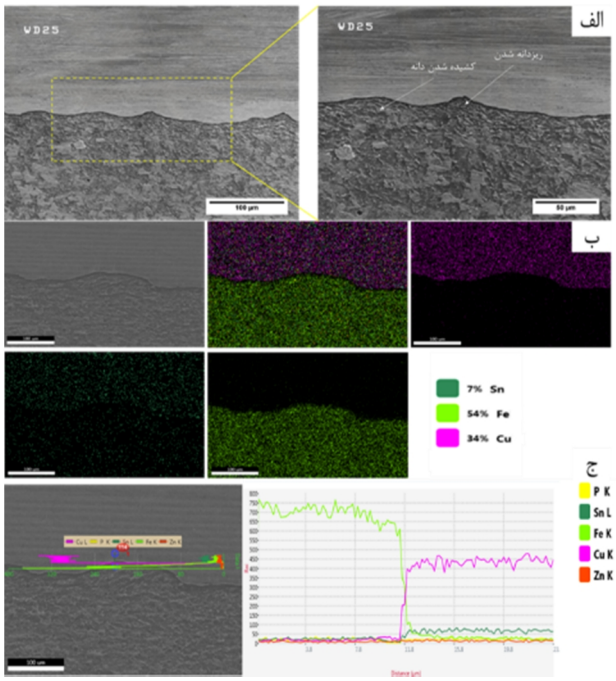
شکل(9-ب) نقشه پراکندگی توزیع عناصر و شکل(9-ج) آنالیز خطی فصل مشترک اتصال نمونه شماره 3 را نشان می‌دهند. در نمونه حاضر با توجه به کاهش انرژی جنبشی برخورد، ذرات فولاد جدا شده از زمینه، چندان قابل رؤیت نیستند. همچنین آنالیز خطی نشان دهنده فصل مشترک با ضخامت پایین و شیب غلظتی بالا است.



شکل 9- تصاویر الف) میکروسکوپی الکترونی روبشی ب) نقشه پراکندگی عناصر ج) آنالیز خطی نمونه شماره3

شکل(10) نمایانگر تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، نقشه پراکندگی عناصر و آنالیز خطی نمونه شماره 4 است. در شکل(10-الف) فصل مشترک موجی همراه با موج‌های بسیار کوتاه، مناطق ریزدانه شده و کشیده شدن دانه‌ها قابل مشاهده هستند. با کاهش فاصله توقف و نسبت بار انفجاری و به دنبال آن کاهش انرژی برخورد نسبت به سایر نمونه‌ها، طول و ارتفاع امواج در نمونه حاضر کاهش چشمگیری داشته و فصل مشترک اتصال به سمت فصل مشترک صاف متمایل شد. هیچ منطقه ذوب موضعی، گردابه یا ذرات فولادی جدا شده از زمینه نیز مشاهده نشد. مناطق ریزدانه شدن و کشیدگی دانه‌ها نیز به طور قابل ملاحظه‌ای نازکتر از نمونه‌های قبلی بود. فصل مشترک صاف معمولاً در اتصالاتی که نیاز به رسانایی الکتریکی بالا باشد مطلوب است. در صورت نیاز به اتصالاتی با استحکام بالا، فصل مشترک‌های با هندسه موجی ترجیح داده می‌شوند.

شکل(10-ب) نقشه پراکندگی توزیع عناصر و شکل(10-ج) آنالیز خطی فصل مشترک اتصال نمونه شماره 4 را نشان می‌دهند. توزیع یکنواخت مس و قلع در زمینه فسفر برنزی و آهن در زمینه فولادی قابل مشاهده است. آنالیز خطی، شیب غلظتی بالاتری را نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد که از ویژگی‌های فصل مشترک صاف است.



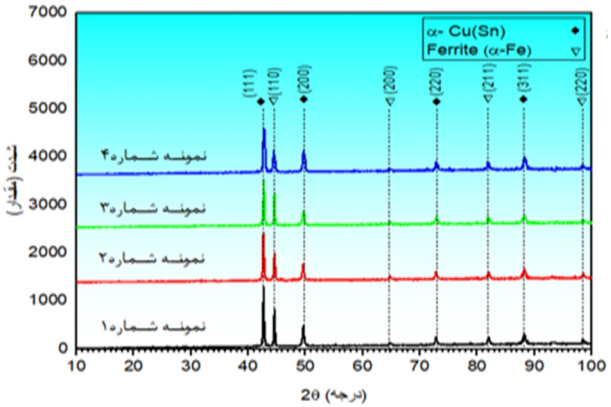
شکل 10- تصاویر الف) میکروسکوپی الکترونس روبشی ب) نقشه پراکندگی عناصر ج) آنالیز خطی نمونه شماره4

جهت اطمینان از عدم تشکیل ترکیبات بین‌فلزی، آزمون طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس از فصل مشترک اتصال‌های جوش داده شده انجام شد. الگوی پراش فصل مشترک نمونه‌های شماره 1 تا 4 در شکل(11) نشان داده شده‌اند. همانطور که از شکل مشخص است، فصل مشترک اتصال، مخلوطی از دو فاز زمینه فسفر برنزی و فولادی است. بدون

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

حضور هیچ فاز جدیدی که توسط انفجار ایجاد شده باشد. در الگوی پراش، هیچ قلّه ای مربوط به تشکیل ترکیبات بین فلزی مشاهده نشد.



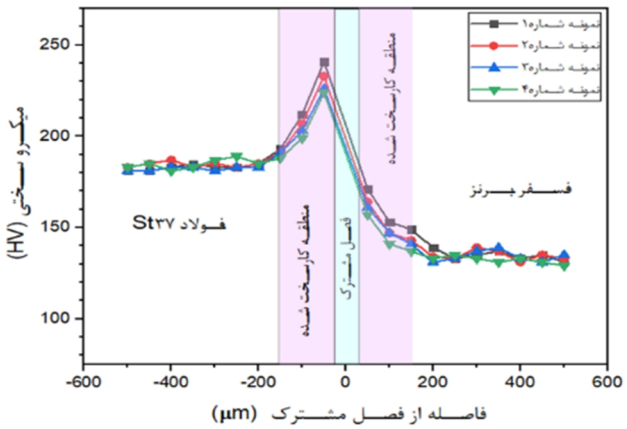
شکل 11- الگوی پراش پرتو ایکس فصل مشترک اتصال‌های انجام شده

در نهایت با بررسی دقیق ریزساختار و توزیع عناصر در فصل مشترک اتصال فسفر برنز و فولاد St37 می‌توان نتیجه گرفت که جوشکاری انفجاری موفقیت آمیز بوده و هیچگونه نقص اتصالی در فصل مشترک ایجاد نشده و همچنین هیچ ترک، حفره انقباضی و یا ترکیب بین‌فلزی در تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مشاهده نشد.

3-3- بررسی خواص مکانیکی

نتایج آزمون ریزسختی سنجی در نزدیکی فصل مشترک نمونه‌های جوشکاری شده در شکل(12) نشان داده شده است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که سختی هم در سمت فولادی و هم در طرف فسفر برنزی اتصال، در نزدیکی فصل مشترک افزایش یافت؛ به طوری که در صفحه فولادی از سختی پایه 180 ویکرز، در فاصله 50 میکرونی از فصل مشترک به 240-220 ویکرز رسید که افزایش 12 تا 33 درصدی را نشان می‌دهد. در صفحه برنزی نیز مقدار ریزسختی از 130 ویکرز به 150-170 ویکرز رسید که افزایشی 11 تا 30 درصدی داشته است. میزان افزایش سختی در طرف فولادی بیشتر از سمت فسفر برنزی بود. محققان [21] علّت افزایش سختی در فصل مشترک جوشکاری انفجاری را پدیده سخت شدن شوکی فلزات می‌دانند. سخت شدن شوکی در اثر انرژی برخورد انتقال یافته ناشی از موج انفجار، ایجاد می‌شود. همچنین پدیده کارسرد شدن نیز با توجه به برخورد دو صفحه پایه و پرنده و تغییر شکل پلاستیک آنها در فصل مشترک اتصال می‌تواند باعث افزایش ریزسختی در این ناحیه شود. با توجه به شکل(12)، منطقه کارسخت شده در هر دو طرف فولادی و مسی در حدود 150 میکرومتر بود.

در نتیجه می‌توان گفت با افزایش نسبت بار انفجاری و فاصله توقف، انرژی برخورد بین صفحات پایه و پرنده افزایش یافته که منجر به تغییر شکل پلاستیک بیشتر در فصل مشترک اتصال می‌شود و در نهایت بر اثر سخت شدن شوکی و کارسختی بیشتر، ریزسختی هم افزایش می‌یابد.



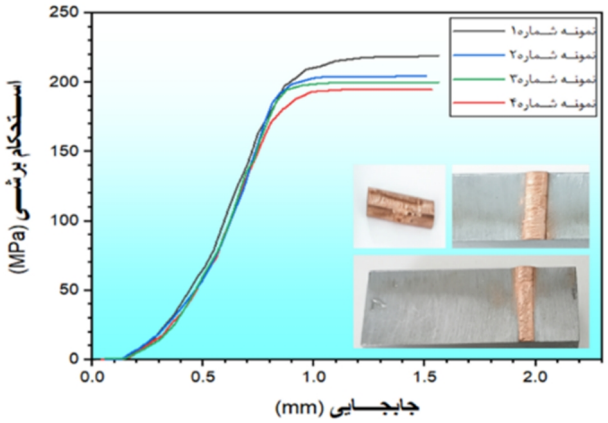
شکل 12- نتایج آزمون ریزسختی سنجی در نزدیکی فصل مشترک نمونه‌های جوشکاری شده

به دلیل امکان تشکیل مناطق ذوب موضعی و ترکیبات بین‌فلزی و همچنین تفاوت در خواص فسفر برنز و فولاد، خواص استحکامی این اتصال اهمّیّت زیادی دارد. به این منظور آزمون استحکام برشی برای هر چهار نمونه انجام شد که نتایج آن در شکل(13) و جدول(5) نشان شده است. استحکام برشی قابل قبول در جوشکاری انفجاری به دو صورت تعریف می‌شود. یکی اینکه استحکام اتصال در فصل مشترک بیشتر از یکی از فلزات پایه باشد و دیگری آنکه فصل مشترک اتصال، استحکام پیوندی حداقل برابر با 140MPa داشته باشد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

با انجام آزمون استحکام برشی دیده شد که در تمام نمونه‌ها شکست در لایه فسفر برنزی اتفاق افتاده و هیچ شکستی به دلیل جدایش نمونه‌ها از فصل مشترک اتصال رخ نداده است. این مطلب بیانگر آن است که در تمام نمونه‌ها استحکام فصل مشترک اتصال ایجاد شده بیشتر از استحکام صفحه فسفر برنزی است. استحکام برشی استاندارد فسفر برنز 92-8 برابر با 164MPa است که در مقایسه با استحکام اتصال‌های انجام شده، مقدار کمتری را نشان می‌دهد که دلیل آن را می‌توان در کارسختی ایجاد شده در نمونه‌های جوش انفجاری شده جستجو کرد. به دلیل ضربه سنگین در حین جوشکاری انفجاری، مواد تغییر شکل شدیدی را تجربه می‌کنند که منجر به کارسختی و در نتیجه افزایش استحکام پیوند می‌شود. بنابراین دلیل افزایش استحکام برشی نمونه شماره 1 در مقایسه با سایر نمونه‌ها را می‌توان انرژی برخورد و کارسختی بیشتر آن بیان کرد.



شکل 13- منحنی‌های آزمون استحکام برشی نمونه‌های جوشکاری شده

مطالعات محققان [7] بیان می‌کند که فصل مشترک با هندسه موجی به دلیل افزایش طول پیوند مؤثر در فصل مشترک اتصال و تشکیل قفل‌های مکانیکی باعث افزایش استحکام جوش می‌شود. همچنین با افزایش ارتفاع و طول امواج در فصل مشترک، استحکام برشی جوش به دلیل افزایش سطح اتصال، افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در فاصله توقف یکسان با افزایش ضخامت ماده منفجره و در ضخامت ماده منفجره یکسان با افزایش فاصله توقف، به دلیل افزایش سرعت و انرژی جنبشی برخورد در فصل مشترک ایجاد شده، کارسختی بیشتر، فصل مشترک موجی‌تر، طول مؤثر پیوند بیشتر و قفل مکانیکی مؤثرتری ایجاد شده و در نهایت استحکام برشی افزایش می‌یابد.

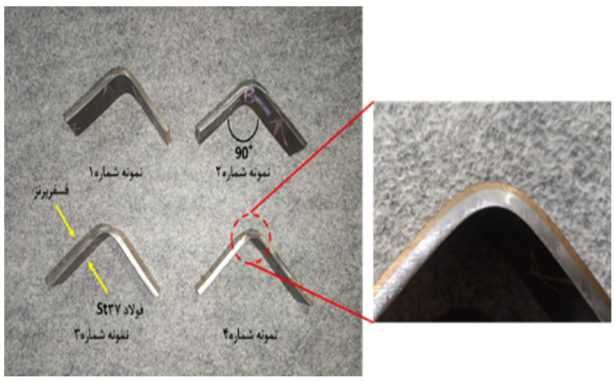
جدول5- نتایج آزمون استحکام برشی نمونه‌های جوشکاری شده

شماره نمونه	استحکام برشی (MPa)
1	219
2	204
3	200
4	195

جدول6- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های جوشکاری شده

شماره آزمون	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی کشش (MPa)	ازدیاد طول (درصد)
1	175,2	488,5	57,1
2	175	436,9	58
3	173,7	431,1	58,6
4	173,3	430,8	59,1

برای ارزیابی بیشتر مقاومت اتصال‌های انجام گرفته، آزمون خمش سه نقطه بر روی نمونه‌های جوشکاری شده انجام شد. شکل(۱۴) مورفولوژی ماکروسکوپی نمونه‌های جوشکاری شده را پس از 90 درجه خم شدن نشان می‌دهد که در آن هیچ ترک، جدایش یا شکستگی در فصل مشترک اتصال یا در صفحات پایه و پرنده مشاهده نشد که نشان‌دهنده خاصیت خمشی عالی اتصال‌های انجام شده است. از آنجایی که هیچ نقصی در سطح اتصال نمونه‌های خم شده وجود نداشت، می‌توان آنها را به راحتی در شرایط کاری به شکل خم شده استفاده کرد.



شکل 14- مورفولوژی ماکروسکوپی نمونه‌های جوشکاری شده پس از 90 درجه خم شدن

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

به منظور بررسی استحکام کششی نمونه‌های جوش انفجاری شده، آزمون کشش بر روی هر چهار نمونه انجام شد. شکل(15) منحنی‌های نیرو-ازدیاد طول نمونه‌ها را طی آزمون کشش و جدول(6) نتایج به دست آمده از این منحنی‌ها را نشان می‌دهند. استحکام کششی ورق فسفربرنز (طبق اطلاعات ارائه شده توسط سازنده) 140MPa و استحکام کششی ورق فولاد St37 برابر با 470MPa بود. بنابراین استحکام نظری اتصال فسفربرنز-فولاد St37 با استفاده از رابطه6 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_1 t_1}{T} + \frac{\sigma_2 t_2}{T} = \frac{140 \times 2}{6} + \frac{470 \times 4}{6} = 360MPa \qquad (6)$$

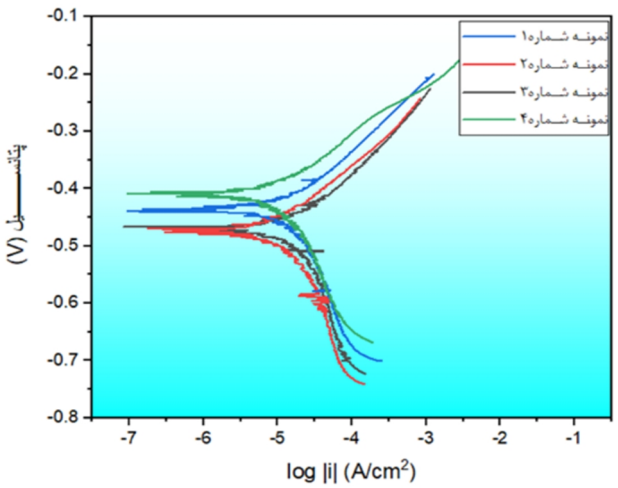
که در آن σ_t استحکام کششی نظری اتصال، σ_1 و t_1 به ترتیب استحکام کششی و ضخامت صفحه پرنده و σ_2 و t_2 استحکام کششی و ضخامت صفحه پایه هستند. طبق رابطه فوق، استحکام نظری اتصال برابر با 360MPa تعیین شد. استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری انفجاری شده بیشتر از مقدار نظری به دست آمد. علّت افزایش استحکام کششی در نمونه‌های جوش انفجاری شده را می‌توان در سخت‌کاری ناشی از برخورد با سرعت بالا در عملیات جوشکاری انفجاری و تغییر شکل‌های پلاستیکی شدید در مناطق جوش داده شده بیان کرد که می‌تواند به طور قابل توجهی شکل‌پذیری فلزات را کاهش داده و استحکام آنها را افزایش دهد [22].

با مقایسه منحنی‌های آزمون کشش و اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری انفجاری شده می‌توان دریافت که با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری که تغییر شکل پلاستیک و کارسختی بیشتری را در پی دارد، استحکام کششی افزایش و درصد ازدیاد طول کاهش می‌یابد. در منحنی‌های آزمون کشش مربوط به هر چهار نمونه، یک افت نیروی جزئی در نزدیکی نقطه بیشینه تنش کششی مشاهده می‌شود. این افت نیرو مربوط به جدایش ورق فسفربرنز از ورق فولادی در حین آزمون کشش بود. در نزدیکی نقطه UTS، اتصال ایجاد شده در فصل مشترک بین فسفربرنز و فولاد جدا شده و در ادامه شکست اتفاق افتاد.

3-4- بررسی رفتار خوردگی

رفتار پلاریزاسیون الکتروشیمیایی اتصال فسفربرنز 92-8 به فولاد St37 در محلول آب دریا در شکل(16) نشان داده شده است. متغیرهای الکتروشیمیایی استخراج شده از این منحنی‌ها شامل شیب‌های تافل آندی و کاتدی، پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) که نمایانگر سرعت خوردگی است و با استفاده از روش اکستراپولاسیون تافل حاصل شدند در جدول(7) ارائه شده‌اند.

نتایج جدول(7) نشان می‌دهد که با افزایش فاصله توقف در نمونه شماره 1 نسبت به نمونه شماره 4، پتانسیل خوردگی تقریباً ثابت مانده ولی چگالی جریان خوردگی از 5/5 به 13/2 میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع افزایش یافته است. همچنین از داده‌های جدول(7) می‌توان دریافت که با افزایش نسبت بار انفجاری از 1/6 به 1/8 در نمونه شماره 2 نسبت به نمونه شماره 4، پتانسیل خوردگی از 416- به 462- میلی ولت کاهش یافته و چگالی جریان خوردگی از 5/5 به 8/9 میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع افزایش یافت.



شکل 15- منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های حاصل از جوشکاری انفجاری

علّت افزایش چگالی جریان خوردگی با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری را می‌توان در افزایش انرژی جنبشی برخورد و در نهایت افزایش انرژی فصل مشترک اتصال جستجو کرد. با افزایش فاصله توقف و نسبت بار انفجاری، اختلاط بین فولاد و

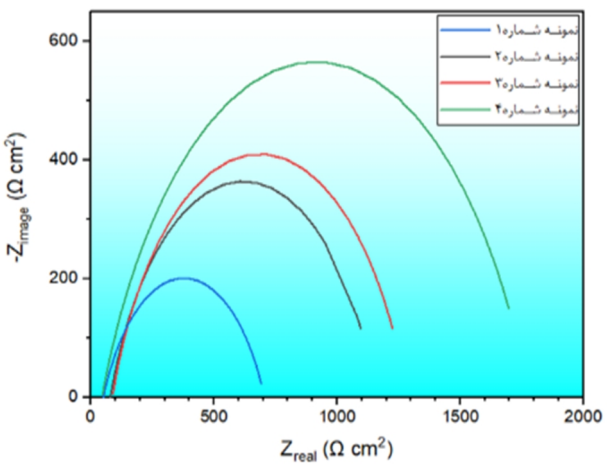
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

فسفر برنز افزایش یافته، اثر خوردگی ناشی از پیل گالوانیک بیشتر شده و در نتیجه چگالی جریان خوردگی افزایش می‌یابد. مناطق ذوب موضعی منجمد شده و گردابه‌های فولادی در فصل مشترک به عنوان آند و فسفر برنز به عنوان کاتد عمل می‌کنند. این مناطق باعث افزایش نسبت سطح آند به کاتد شده و در نهایت منجر به افزایش تمرکز خوردگی در فصل مشترک اتصال می‌شوند. از آنجایی که این مناطق در نمونه‌های با نسبت بار انفجاری و فاصله توقف بیشتر تشکیل می‌شوند، سرعت خوردگی در این نمونه‌ها بیشتر است.

جهت بررسی لایه سطحی ایجاد شده به وسیله نمونه‌ها در محیط خورنده، آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی انجام شد. نمودارهای نایکوئیست مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده در شکل(17) نشان داده شدند. نمودارهای حاصل شده به وسیله نرم‌افزار Zview تحلیل و متغیرهای الکتروشیمیایی مربوط به هر نمودار، استخراج شده و در جدول(8) ارائه شدند. در تحلیل داده‌های آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، پدیده‌های الکتروشیمیایی مثل لایه دوگانه الکتریکی، نفوذ و مقاومت محلول را به عناصر الکتریکی نسبت داده و یک مدار الکتریکی از یک سامانه الکتروشیمیایی ساخته شده و این سامانه الکتروشیمیایی حاصل شده به صورت کمی و کیفی توصیف می‌شود. مدار الکتریکی معادل سامانه الکتروشیمیایی حاضر در پژوهش حاضر که به طور مطلوبی با نتایج تجربی تطابق دارد در شکل(18) نمایش داده شده است. شکل(17) نشان می‌دهد که حلقه‌های امپدانس حاصل شده در منحنی نایکوئیست نسبت به نیم دایره کامل کمی انحراف دارند. این پدیده که تحت عنوان اثر پایین افتادگی شناخته می‌شود به پراکندگی بسامد، مقاومت انتقال جرم و ناهمگنی‌های سطحی نسبت داده می‌شود. این اختلاف به وسیله رفتار غیرایده‌آل لایه دوگانه الکتریکی به عنوان یک خازن تعریف می‌شود. بنابراین برای توصیف آن، نیاز به بکارگیری یک عنصر ثابت فازی (CPE) به جای خازن غیرایده‌آل لایه دوگانه به علّت توزیع زمان‌های آسایش ناشی از غیریکنواختی‌های موجود در سطوح مانند ناخالصی‌ها، زبری، جذب بازدارنده‌ها، لایه‌های متخلخل و نفوذ به منظور دستیابی به نتایج و تحلیل دقیق‌تر ضروری است. به دلیل اعمال پتانسیل سینوسی و دریافت جریان سینوسی به جای پتانسیل و جریان ثابت، در مدار الکتریکی معادل، به جای مقاومت (R) از متغیر عمومی‌تر امپدانس (Z) استفاده می‌شود. امپدانس یک عنصر فاز ثابت به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (7)$$

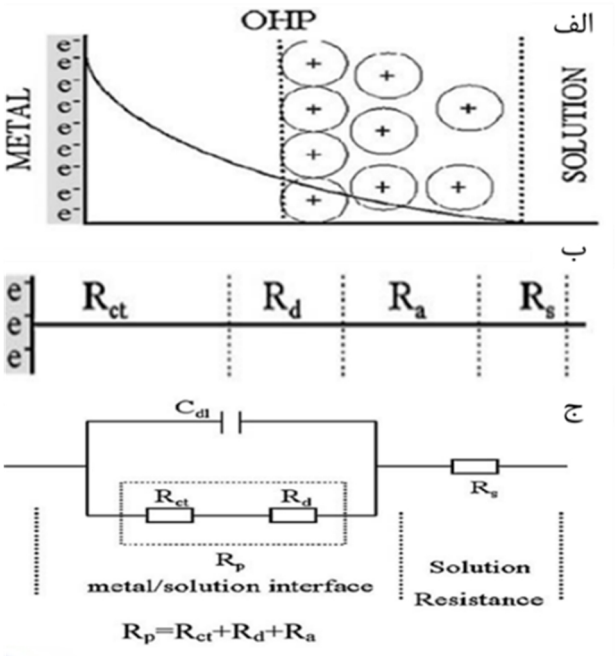
که در آن Y_0 فاکتور نسبیتی (ادمیتانس) و n ضریب غیریکنواختی سطح (اختلاف فاز) می‌باشند. هر چه مقدار n کوچکتر باشد، به معنای عدم پیوستگی و یکنواختی کمتر در فصل مشترک اتصال است. در این حالت به علّت متناسب بودن جریان خوردگی با سطح تماس محلول با فلز، جریان خوردگی بیشتر است. هر چقدر که مقدار ناپیوستگی‌ها و عیوب در فصل مشترک اتصال بیشتر باشد، سطح تماس مؤثر بین محلول و فلز بیشتر شده و در نهایت باعث افزایش جریان خوردگی می‌شود. مقدار عددی n می‌تواند از 1- تا 1 متغیر باشد. به ازای n=0 عنصر فاز ثابت رفتار مقاومتی خالص، به ازای n=-1 رفتار ظرفیتی خالص و به ازای n=1 رفتار القایی خالص خواهد داشت [22]. در صورت وجود بازدارنده‌ها، مقاومت پلاریزاسیون (R_P) شامل مقاومت لایه بازدارنده بر روی سطح فلز (R_f)، مقاومت انتقال بار (R_{ct}) مقاومت لایه نفوذی (R_d) و مقاومت ذرات انباشته شده در فصل مشترک فلز-محلول (R_a) می‌شود.



شکل 16- منحنی‌های نایکوئیست نمونه‌های جوشکاری شده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]



شکل 17- الف) توزیع پتانسیل در فصل مشترک فلز - محلول ب) مقاومت‌های موجود در لایه دوگانه الکتریکی ج) مدار معادل الکتریکی ارائه شده برای محلول بدون حضور بازدارنده

با توجه به جدول(8) می‌توان دریافت که نمونه شماره 1 با توجه به فاصله توقف و نسبت بار انفجاری بالا، سرعت و انرژی برخورد بیشتری داشته که منجر به ایجاد گردابه‌های بیشتری در فصل مشترک اتصال شده و در نهایت ضریب غیریکنواختی سطح کاهش یافته است. مقدار n در نمونه شماره 1 برابر با 0,77 و در نمونه شماره 4 با فاصله توقف کمتر، برابر با 0,83 بود که نشان می‌دهد در نمونه شماره 4 به دلیل انرژی برخورد کمتر، فصل مشترک یکنواخت‌تری حاصل شده است. افزایش n که نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر فصل مشترک اتصال است به معنای کاهش سطح تماس موثر بین محلول و فلز است که در نهایت منجر به کاهش جریان خوردگی می‌شود.

به طور کلی، در این باره می‌توان بیان کرد که با افزایش فاصله توقف و نسبت بار انفجاری، انرژی برخورد افزایش یافته، فصل مشترک اتصال موجی‌تر و گردابه‌ای‌تر شده، ضریب غیریکنواختی سطح کاهش یافته که منجر به افزایش سطح تماس مؤثر بین محلول و فلز شده و در نهایت جریان خوردگی افزایش یافته است.

در نهایت می‌توان گفت با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری، سرعت و زاویه برخورد بیشتر می‌شوند و در نتیجه طول و ارتفاع امواج بیشتر شده که بهبود خواص مکانیکی از جمله سختی، استحکام برشی و استحکام نهایی را در پی دارد. همچنین می‌توان بیان کرد با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری، مقاومت در برابر خوردگی کمتر می‌شود. افزایش این دو متغیر منجر به اختلاط بیشتر در فصل مشترک شده که باعث کاهش ضریب غیریکنواختی سطح می‌شود و به دنبال آن چگالی جریان خوردگی افزایش و پتانسیل خوردگی و مقاومت پلاریزاسیون کاهش می‌یابند. جدول(9) به طور خلاصه ارتباط بین آزمون‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر متغیرهای انفجاری بر ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال فسفر برنز 92-8 به فولاد St37 بررسی و نتایج ریز حاصل شد:

-با افزایش فاصله توقف و نسبت بار انفجاری، فصل مشترک اتصال از حالت صاف به موجی همراه با گردابه تبدیل شده و دانه‌ها در مجاورت فصل مشترک، بیشتر دچار کشیدگی شدند.

-نتایج آزمون ریزسختی سنجی نشان داد که در مجاورت فصل مشترک اتصال، سختی نسبت به فلز پایه 12 تا 33 درصد افزایش یافت که دلیل آن کارسختی ایجاد شده بر اثر برخورد صفحات پایه و پرنده بود.

-با انجام آزمون برش مشخص شد که با موجی شدن فصل مشترک و افزایش مساحت واقعی پیوند، به دلیل ایجاد پدیده قفل مکانیکی، استحکام برشی اتصال‌ها افزایش یافت..

-با افزایش نسبت بار انفجاری و فاصله توقف، استحکام کششی اتصال‌ها 8 تا 12 درصد افزایش و میزان درصد ازدیاد طول آنها به دلیل پدیده کارسختی بیشتر در فصل مشترک اتصال، کاهش یافت.

-نتایج آزمون پلاریزاسیون نشان داد که با افزایش متغیرهای انفجاری، پتانسیل خوردگی کاهش و چگالی جریان خوردگی از 5/5 به 13/2 میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع افزایش یافت.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]

-بر اساس نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، با افزایش نسبت بار انفجاری و فاصله توقف، مقاومت در برابر خوردگی و ضریب غیریکنواختی سطح کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش سرعت خوردگی با افزایش متغیرهای جوشکاری انفجاری بود.

منابع

1- R. Mendes and J. Ribeiro and A. Loureiro, "Effect of Explosive Characteristics on the Explosive Welding of Stainless Steel to Carbon Steel in Cylindrical Configuration" , Mater, Des, 2013, 51, 182-192.

2- G. Costanza and V. Crupi and E. Guglielmino and A. Sill and M. E. Tata, "Metallurgical Characterization of an Explosion Welded Aluminium/Steel Joint" Mrtal, Ital, 2016, 108, 17-22.

3- G. H. S. F. L. Carvalho and I. Galvao and R. Mendes and R. M. Leal and A. Loureiro, "Explosive Welding of Aluminium to Stainless Steel Using Carbon Steel and Niobium Interlyers" , Mater, Process, Technol, 2020, 283, 116707.

4- Y.liu and Ch. Li and X. Hu and Ch. Yin and T. Liu, "Explosive Welding of Copper to High Nitrogen Austenitic Stainless Steel", Mater, Mar, 2019.

5-M. Rastgho, Z. Raofi, M. Ganbari. "The effect of rolling process on the explosively welded copper-aluminum interface, 5th International Conference on Welding and Non-Destructive Testing", 23rd National Conference on Welding and Inspection, 12th National Conference on Non-Destructive Testing, and 1st National Conference on Additive Manufacturing, Isfahan, 2022.

6- Zhang, H., Jiao, K. X., Zhang, J. L., & Liu, J. "Comparisons of the microstructures and micro-mechanical properties of copper/steel explosive-bonded wave interfaces". Materials Science and Engineering: A, 756, 430-441, 2019.

7- A. Durgutlu and H. Okuyucu and B. Gulench, "Investigation of Effect of the Stand-off Distance on Interface Characteristics of Explosively Welded Copper and Stainless Steel", Des, 2008.

8- Liu, Y., Li, C., Hu, X., Yin, C. and Liu, T. "Explosive welding of copper to high nitrogen austenitic stainless steel". Metals, 9(3), p.339, 2019.

9- Shan, S., Liu, Y., Zhang, J., Fan, X., & Jiao, K. "Explosion welding research on large-size ultra-thick copper-steel composites: A review". Journal of Materials Research and Technology, 24, 4130-4142, 2023.

10-E. Mohamadi and S.A.A. Mousavi, "The effect of explosive welding variables on the explosive joint corrosion behavior of St-52 copper steel sheets, 7th International Conference on Welding and Nondestructive Testing", 25th National Conference on Welding and Inspection, 14th National Conference on Nondestructive Testing and 3rd National Conference on Additive Manufacturing, Tehran, 2024.

11-H. Nikbakht, M. Khanzadeh, H. Bakhtiari, "Investigation of the effect of explosive welding variables on the corrosion behavior of explosive double-layer joints of 5000 series aluminum sheets – copper", JWSTI 2022; 7 (2) :13-24, 2021.

12- Shiran, M. R. K. G., Razazi, M., Bakhtiari, H., & Tavira, A. "Evaluation of Welding Parameter's Effects on Corrosion Behavior of Bronze-Carbon Steel Dual-Layer Explosion Welded Joint at Salt Enviroment". Materials Research, 21(2), e20170619, 2018.

13- B. Crossland, "Explosive Welding of Metals and Its Application", Clarendon press, Oxford, 1982.

14- - Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, ASTM E384-11, Vol.03.01, 2011.

15- Standard 50162, "Determination of Shear Strength Between Cladding Metal and Parent Metal in Shear Test", DIN, 1978.

16- ASTM A263-12, Standard Specification for Stainless Chromium Steel-Clad Plate, USA, 1-2, 2012

17- 65. Inao, D., Mori, A., Tanaka, S., & Hokamoto, K. "Explosive welding of thin aluminum plate onto magnesium alloy plate using a gelatin layer as a pressure-transmitting medium". Metals, 10(1), 106, 2020.

18- 62. Carpenter, S. H., & Wittman, R. H. "Explosion welding". Annual review of materials science, 5(1), 177-199, 1975.

19- A. Deribas, V. Simonov, L. Zakcharenko, "Investigation of Explosive Welding Parameters for Arbitrary Combinations of Metals and Alloys", Proc. of the 5th Int. Conf. on High Energy Rate, 1-24, 1975.

20- Yang M, Ma H, Shen Z, Huang Z, Tian Q, Tian J. Dissimilar material welding of tantalum foil and Q235steel plate using improved explosive welding technique.
MaterDesj.matdes.2019.108348.2020;186:108348.

21- Kahramana N, Gülenç B, Findik F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface. Journal of Materials Processing Technology. 2005;169(2):127-133.

22- Acarer M, Gu¨lenc¸ B, Findik F. Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength. Mater Des 2003;24:659e64.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.17]