

## تأثیر گرمایش طولانی بر رفتار مکانیکی و تریبولوژی پوشش‌های غوطه‌وری بر

## پایه روی

فاطمه بانسی، دکتر فخرالدین اشرفی زاده، دکتر مهدی علیزاده

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۰۹/۱۳ - پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۰۳)

## چکیده

در این پژوهش خواص مکانیکی و رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های گالوانیزه و گالوالوم تولید شده به روش غوطه‌وری داغ، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته و با توجه به کاربرد ورق‌های پوشش‌دار در شرایط بالاتر از دمای اتاق، اثر سیکل‌های حرارتی طولانی مدت نیز بر خواص این ورق‌ها مطالعه شده است. بدین منظور نمونه‌هایی از ورق فولاد کربنی با پوشش گالوانیزه و پوشش گالوالوم با ضخامت‌های یکسان آماده سازی شد و ریزساختار و مورفولوژی سطح نمونه‌ها و ترکیب شیمیایی نواحی مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروآنالیز مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب فازی و بافت کریستالی پوشش‌ها نیز به روش پراش پرتو ایکس تعیین شد. جهت بررسی خواص مکانیکی ورق‌های پوشش‌دار از سختی‌سنج ویکرز و آزمون کشش استفاده شد؛ علاوه بر این، خواص تریبولوژیکی پوشش‌ها توسط آزمون پین روی دیسک مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه یافته‌های آزمایشگاهی مشخص نمود که به‌طور کلی استحکام ورق گالوانیزه از ورق گالوالوم بیشتر است؛ پوشش گالوالوم ازدیاد طول نسبی بالاتر و رفتار سایشی ضعیف‌تری نسبت به ورق گالوانیزه نشان داد. در ورق گالوانیزه حرارت دیده در دماهای بیشتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، از یک طرف نفوذ آهن از زیرلایه فولادی به سمت سطح پوشش سبب تشکیل فازهای ترد بین‌فلزی می‌شود که تأثیر منفی بر رفتار سایشی ورق گالوانیزه دارد، از طرف دیگر با تشکیل لایه اکسیدی مقاوم بر سطح پوشش رفتار اصطکاکی بهتر می‌شود. با حرارت دادن ورق گالوالوم در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد سطح پوشش تیره شد و برآمدگی‌هایی ناشی از تشکیل فازهای بین‌فلزی و لایه اکسید بر سطح پوشش نمایان گشت. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق در کاربردهایی که ضریب اصطکاک اهمیت دارد، گرمایش ورق گالوانیزه در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و ورق گالوالوم در دماهای بیشتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: پوشش گالوانیزه، پوشش گالوالوم، سیکل‌های حرارتی، خواص مکانیکی، رفتار تریبولوژیکی.

## The Effect of Long-Term Thermal Cycles on The Mechanical and Tribological Properties of Hot-Dip Galvanized and Galvalume Coatings

Fateme Baneshi, Fakhreddin Ashrafizadeh, Mehdi Alizadeh

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 8415683111

(Received 3 December 2019, accepted 23 December 2020)

### Abstract

In this study, the mechanical properties and tribological behavior of galvanized and galvalume coatings produced by hot dip method have been evaluated and compared. In addition, due to the high application of these types of sheets at high temperatures, the effect of long-term thermal cycles on the properties of these sheets was studied. For this purpose, samples of carbon steel plate with galvanized coating and galvalume with the same thickness were prepared. Then, structural and surface morphology was studied by scanning electron microscope and Elemental analysis, phase composition and crystalline texture were determined by X-ray diffraction. The mechanical properties of the coatings were evaluated by using Vickers hardness test and tensile test. The tribological properties of the coatings were investigated by pins on the disk test. Laboratory findings showed that overall the strength of galvanized sheet are greater than the Galvalume sheet, while it has a relatively less long elongation. while Galvalume has a weaker abrasive behavior than galvanized. In the case of galvanized sheet heat up to 300 ° C, the iron penetration from the steel substrate to the surface of the coating occurs and it forms brittle intermetallic phases that have a negative effect on the galvanized abrasion behavior. In other side, oxide layers also form on the surface of the coating and due to a better abrasive behavior. By heating the galvalume sheet at temperatures up to 400 ° C, the surface of the cover is dark, and bulges appear on it which indicates the formation of intermetallic phases and the presence of oxide on the surface of the coating. According to the results of this research in applications that friction coefficient is important, it is not recommended to heat galvanized and galvalume coatings at temperatures, respectively, above 300 ° C and 400° C.

**Keywords:** galvanized, Galvalume, thermal cycles, mechanical properties, tribological properties.

**E-mail of corresponding author:** [abbasimarzieh@gmail.com](mailto:abbasimarzieh@gmail.com).

## مقدمه

لایه مانع  $Fe_2Al_5$ ، در فصل مشترک زیرلایه و پوشش می‌شود [۳] که به عنوان حایلی بین ورق فولاد و مذاب روی مانع از ایجاد ترکیبات بین فلزی Fe-Zn خواهد شد و مشکل حضور فازهای ترد را مرتفع می‌سازد.

پوشش‌های روی تقریباً خالص که به روش‌های مختلف ایجاد می‌شوند مقاومت مکانیکی و خوردگی قابل قبولی دارند. اما در چند دهه اخیر، پوشش‌های آلیاژی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. دلیل این توجه، کاهش هزینه مواد برای ایجاد پوشش به همراه افزایش عمر آن است. افزایش عمر پوشش، موجب کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری قطعات پوشش‌دار می‌شود [۴].

نوعی از پوشش‌های آلیاژی روی-آلومینیوم به نام گالوالوم در سال ۱۹۶۲ به وسیله انجمن مهندسی بین‌المللی بتلهم<sup>۱</sup> به ثبت رسید و اولین تولید تجاری آن در سال ۱۹۷۲ آغاز شد. پوشش گالوالوم تا حدود ۵۵ درصد وزنی آلومینیوم، ۴۳/۵ درصد وزنی روی، ۱/۵ درصد وزنی سیلیسیم و مقادیر خیلی کمی از سایر عناصر دارد [۵] (جدول ۱). این پوشش خواص مطلوب هر دو فلز روی و آلومینیوم را داراست؛ به دلیل حضور آلومینیوم، پوشش از مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون مطلوبی برخوردار است و دمای بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد را بدون تغییر ظاهری تحمل می‌کند ولی در دماهای بالاتر کمی اکسید می‌شود. از سوی دیگر حضور روی موجب شکل‌پذیری ورق و حفاظت گالوانیکی فولاد می‌شود [۶]. طبق تحقیقات قبلی در زمینه ورق گالوالوم، سه فاز بین فلزی متفاوت در لایه آلیاژی شناسایی شده است [۷]. این فازها عبارتند از: دانه‌های کشیده افقی مستقیماً در همسایگی با زیرلایه آهنی (فاز  $Fe_2Al_5$  - با ساختار اورتورمبیک مرکزدار)، یک لایه دانه‌های کشیده عمودی بالای فاز اتا (به عنوان فاز  $FeAl_3$

ایجاد پوشش‌های روی خالص و آلیاژی بر سطح فولاد یکی از تکنیک‌های فرایندی بسیار مهم مورد استفاده در صنعت محسوب می‌شود. از نقطه نظر فناوری، قواعد کلی گالوانیزه از بیش از ۲۰۰ سال پیش بدون تغییر باقی مانده است، اگرچه به دلیل کاربردهای متنوع در صنعت اتومبیل و ساختمان، میزان قابل توجهی از تحقیقات جدید در زمینه فرایند گالوانیزه و انواع جدید پوشش‌های آلیاژی روی انجام شده است. به صورت تجاری، با افزودن آلومینیوم به حمام روی سه نوع مهم از پوشش‌ها شامل گالوانیزه، گالفان و گالوالوم تولید می‌شوند [۱]. در این پژوهش پوشش‌های گالوانیزه و گالوالوم مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

در تولید ورق گالوانیزه به روش گرم، وقتی فولاد در حمام مذاب روی غوطه‌ور می‌شود بسته به نوع ترکیب شیمیایی حمام و زیرلایه، تعدادی واکنش اتفاق می‌افتد که منجر به رشد لایه‌های بین فلزی و در نتیجه ایجاد پوشش چندلایه می‌گردد. لایه‌های بین فلزی گالوانیزه گرم به ترتیب از سطح فولاد به طرف خارج عبارت‌اند از: لایه گاما ( $Fe_3Zn_{10}$ ) حاوی ۱۸ تا ۳۱ درصد وزنی آهن، لایه دلتا ( $FeZn_{10}$ ) حاوی ۸ تا ۱۳٪ آهن، لایه زتا ( $FeZn_{13}$ ) حاوی ۶ تا ۷ درصد وزنی آهن و لایه خارجی اتا که تقریباً روی خالص با حدود ۰/۰۴ درصد وزنی آهن محلول در آن است. لایه گاما که در تماس با سطح ورق است و درصد آهن زیادی دارد به دلیل سختی و شکنندگی ذاتی، شکل‌پذیری ورق را کاهش می‌دهد، مقاومت به خوردگی این لایه نیز در مقایسه با دیگر لایه‌ها پایین‌تر بوده و در مجموع برای محصول گالوانیزه نامطلوب به شمار می‌آید. برای کنترل لایه‌ها و بهبود خواص آن، معمولاً مقداری آلومینیوم (تا ۰/۲ درصد) به حمام گالوانیزه اضافه می‌شود [۲]. افزودن آلومینیوم به حمام مذاب از واکنش بین آهن جامد و روی مذاب جلوگیری می‌کند. آلومینیوم باعث تشکیل

<sup>1</sup> Bethlehem

اتاق برای مدت زمان معلوم، جهت امکان سنجی کاربرد آنها در بدنه گرمکن‌ها و دودکش‌ها، دیواره کوره‌ها و موارد مشابه است. به این منظور ورق‌های گالوانیزه، گالوالوم و فولاد بدون پوشش بعد از قرارگرفتن در دماهای مورد مطالعه، جهت بررسی مشخصه‌های سطحی و مکانیکی پوشش‌ها با آزمون‌های زبری سنجی، سختی سنجی، چسبندگی، آزمون سایش پین روی دیسک و آزمون کشش بررسی شده و نتایج در این مقاله ارائه شده است.

#### مواد، تجهیزات و روش تحقیق

جهت انجام تحقیق پیش‌رو سه نمونه ورق شامل، فولاد بدون پوشش با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۱، ورق فولادی ۰/۵ میلی‌متری با پوشش گالوانیزه و ورق با پوشش گالوالوم، از تولیدات یک شرکت داخلی تهیه گردید؛ ورق‌های گالوانیزه و گالوالوم به روش غوطه‌وری داغ پیوسته تولید شده‌اند. به‌منظور انجام سیکل‌های حرارتی و آزمون‌های مورد نیاز در این تحقیق از هر ورق و برای هر دما، نمونه‌های گرد به قطر ۵۰ میلی‌متر و نمونه‌های کشش برش داده شد و سپس، جهت از بین بردن چربی و آلودگی‌های روی سطح، نمونه‌ها با الکل رقیق شسته و خشک شدند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی زیرلایه فولادی

عنصر	Cr	Mn	P	S	Si	C	Fe
%wt	۰/۰۲۶۸	<۰/۰۵۶۶	<۰/۰۰۸۰	<۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۰	۰/۰۵۲۶	بقیه

نمونه‌ها پس از گذشت زمان‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۲ ساعت و سپس هر ۱۲ ساعت تا پایان ۹۶ ساعت وزن شدند و نمودار تغییر وزن نمونه‌ها رسم گردید. کدگذاری نمونه‌ها طبق جدول ۲ در نظر گرفته شد؛ S نمایانگر زیرلایه فولادی، Z مربوط به ورق گالوانیزه و AZ نشانگر ورق گالوالوم است.

–  $\theta$  با ساختار منوکلینیک) و بالای فاز تتا دانه‌های بزرگ فاز  $Al_{20}Fe_5Si_2 - \alpha$  با ساختار bcc.

علی‌رغم پژوهش‌های گسترده‌ای که در این زمینه انجام شده است، همچنان نکات ناشناخته‌ای از رفتار این نوع پوشش‌ها جهت استفاده در برخی کاربردهای صنعتی باقی مانده است. همانطور که اشاره شد، مقاومت خوردگی پوشش‌ها به تعدد مورد مطالعه قرارگرفته در صورتی‌که خواص مکانیکی و تریبولوژیکی به ندرت بررسی شده است. این در حالی است که برای قطعاتی از ورق‌های پوشش‌دار که تحت کشش عمیق یا سایر عملیات شکل-دهی سرد قرار می‌گیرند، خواص مکانیکی و ضریب اصطکاک از عوامل کلیدی محسوب می‌شود و احتیاج به مطالعه بیشتر دارند. از طرفی در بعضی کاربردها، پوشش‌های روی به مدت طولانی در دماهای نسبتاً بالا قرار می‌گیرند، با این وجود اکثر مطالعات صورت گرفته خواص پوشش را در دمای اتاق و بدون اثرات حرارتی مورد بررسی قرار داده‌اند و از رفتار قطعات پوشش‌داری که ممکن است مدت طولانی در معرض دماهای بالاتر قرارگیرند، اطلاعات کافی در دسترس نیست.

هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی خواص پوشش‌های بر پایه روی، پس از قرارگرفتن در دماهای بالاتر از دمای

یک بخش از نمونه‌ها تحت سیکل‌های حرارتی طولانی مدت در کوره الکتریکی اکسایتون<sup>۲</sup> با اتمسفر محیط قرار گرفتند. حرارت دادن بدین صورت بود که هر نمونه، پس از وزن شدن، به مدت ۹۶ ساعت در کوره و در دماهای ۳۰۰، ۳۵۰، ۳۷۵ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت.

<sup>۲</sup>.Exciton Co

دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت. داده‌های آزمون کشش به صورت نمودار تنش- کرنش رسم شد و استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، استحکام شکست و درصد ازدیاد طول نسبی محاسبه شد [۸].

برای انجام آزمون سایش پین روی دیسک، نمونه‌های گرد به قطر ۵ سانتی‌متر توسط پانچ برش داده شد و در شرایط قبل و بعد از حرارتی‌دهی، مورد بررسی قرار گرفتند. در آزمون سایش، میزان سایش بر اساس کاهش وزن نمونه یا کاهش حجم تعیین می‌شود. مقدار سایش به نیرو، مسافت، روش انجام آزمایش و سرعت حرکت دو جسم روی یکدیگر بستگی دارد. در حین آزمایش، نیروی اصطکاک اندازه‌گیری شد و با داشتن نیروی عمودی، ضریب اصطکاک به‌طور پیوسته بر حسب مسافت سایش رسم گردید. در این روش، جسم در حال آزمایش در تماس با پین حرکت می‌کند و کاهش وزن آن بر حسب مسافت طی‌شده تعیین می‌شود. قبل از شروع آزمایش، نمونه‌ها با استن شستشو و خشک شدند تا جسم خارجی روی سطح باقی نماند. سپس نیروی مناسب اعمال و تعداد دور لازم تنظیم شد. تغییر رنگ، تغییر شکل در محل سایش، ترک‌های ریز و برآمدگی‌ها پایش شد و اندازه‌گیری کاهش وزن یا اثر سایش حداقل در سه نوبت انجام گرفت. داده‌های مسافت- ضریب اصطکاک توسط کامپیوتر ذخیره سازی و منحنی مربوطه به‌صورت پیوسته ترسیم شد. از آنجا که انتخاب بار اعمالی در آزمون سایش به نوع نمونه و بارپذیری پوشش بستگی دارد، پس از آزمایش‌های مقدماتی در روش پین روی دیسک، چهار نیروی ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ گرم انتخاب شد و نمونه‌ها در دمای اتاق تا مسافت ۲۰۰ متر به‌طور پیوسته تحت سایش قرار گرفتند. در ابتدای هر آزمایش وزن نمونه و پین توسط ترازو با دقت ۰/۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری شد و پس از آزمایش کاهش وزن نمونه محاسبه شد. سطوح بعد از سایش و براده حاصل از سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی

اعداد ذکر شده پس از حروف، دمای حرارت‌دهی را بر حسب درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

جدول ۲. کدگذاری نمونه‌های آزمایشی

کد نمونه	شرایط نمونه
S	ورق فولاد زیرلایه
Z	ورق گالوانیزه تازه تولید
Z300	ورق گالوانیزه حرارت‌دهی شده در ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد
Z350	ورق گالوانیزه حرارت‌دهی شده در ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد
Z375	ورق گالوانیزه حرارت‌دهی شده در ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد
Z400	ورق گالوانیزه حرارت‌دهی شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد
AZ	ورق گالوانوم تازه تولید
AZ300	ورق گالوانوم حرارت‌دهی شده در ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد
AZ350	ورق گالوانوم حرارت‌دهی شده در ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد
AZ375	ورق گالوانوم حرارت‌دهی شده در ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد
AZ400	ورق گالوانوم حرارت‌دهی شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

سختی نمونه‌ها در مقیاس ویکرز توسط دستگاه ریزسختی سنج به‌لر اندازه‌گیری شد، به این صورت که فرورونده الماسی با بار ۵۰۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه بر سطح اعمال گردید و سپس با انجام محاسبات مربوطه عدد سختی اندازه‌گیری شد. سختی هر نمونه سه مرتبه اندازه‌گیری شد و میانگین آنها به عنوان سختی گزارش شده است.

به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر از آزمایش کشش تک محوری، نمونه‌هایی طبق استاندارد DIN 50114 تهیه شد و سپس با دستگاه کشش با سرعت فک ۵ میلی‌متر بر

رویشی بررسی شد و مکانیزم‌های سایش مورد مطالعه قرار گرفت.

## نتایج و بحث

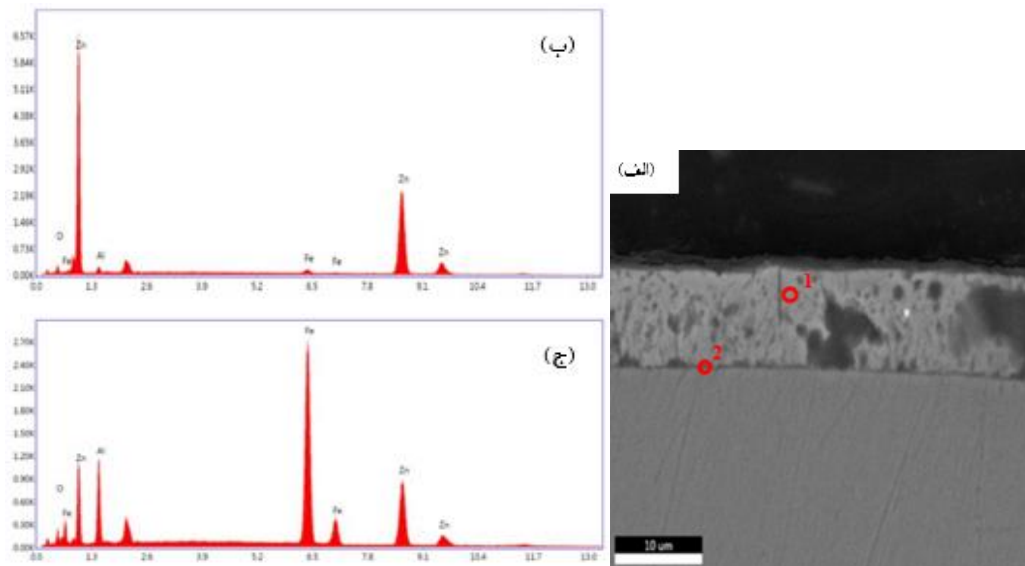
### ۱- ساختار و آنالیز پوشش‌ها

#### پوشش‌های تازه تولید

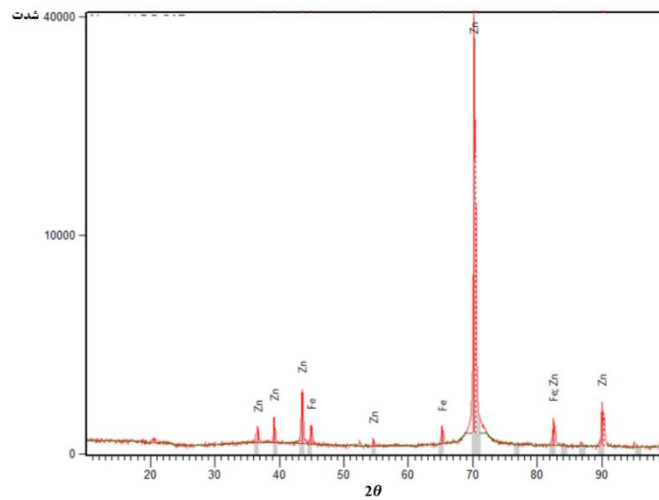
سطح مقطع ورق گالوانیزه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز شیمیایی لایه‌ها با میکروآنالیز EDS مورد بررسی قرار گرفت؛ همانطور که در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود پوشش گالوانیزه ضخامت حدود ۱۰ میکرون دارد که با توجه به آنالیز EDS نقاط ۱ و ۲ (شکل ۱-ب و ۱-ج) متشکل از لایه اتا، روی خالص، است و در فصل مشترک عناصر آلومینیوم و آهن شبیه به لایه ناپیوسته‌ای ظاهر شده است. در فرایند تولید ورق، مقدار آلومینیوم افزوده شده به حمام غوطه‌وری احتمالاً بیش از ۰/۳ درصد بوده است، با افزودن آلومینیوم به حمام مذاب روی و تشکیل لایه بین فلزی Fe-Al از تشکیل فازهای سخت و ترد Fe-Zn جلوگیری می‌شود. در تحقیقی که اخیراً توسط

مین و همکارانش [۹] در زمینه مقدار آلومینیوم حمام گالوانیزه انجام گرفته است، نشان داده شده که میزان آلومینیوم تا ۰/۱ درصد وزنی اثری بر ساختار ورق ندارد، اما با افزایش مقدار آلومینیوم، پدیده نفوذ بین آهن و آلومینیوم رخ می‌دهد و منجر به جوانه‌زنی و رشد فاز  $Fe_2Al_5$  می‌شود؛ ضخامت این لایه حایل که بین زیرلایه و پوشش روی به وجود می‌آید با افزایش مقدار آلومینیوم حمام افزایش می‌یابد.

الگوی پراش پرتو ایکس ورق گالوانیزه در شکل ۲ نشان داده شده است، پوشش گالوانیزه از روی تقریباً خالص تشکیل یافته و محاسبات کمی فازها و میکروآنالیز EDS از سطح پوشش نیز مؤید این موضوع است. مقداری آهن فلزی در الگوی پراش مشاهده شد که با توجه به عمق مؤثر پرتو ایکس و ضخامت نسبتاً کم پوشش به زیرلایه فولادی مربوط می‌شود.



شکل ۱. (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع ورق گالوانیزه، (ب) میکروآنالیز EDS از نقطه ۱، (ج) میکروآنالیز EDS از نقطه ۲.

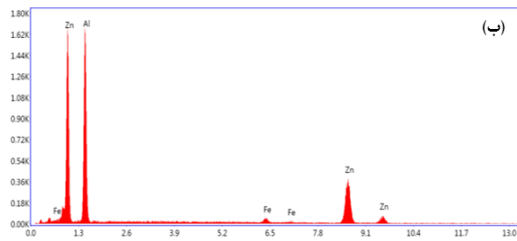


شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس ورق گالوانیزه.

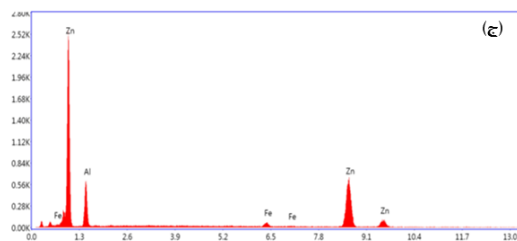
دندریت غنی از آلومینیوم فاز اصلی پوشش است و لایه‌های بین فلزی، میان پوشش و فولاد، شامل  $FeAl_3$  ( $Fe_4Al_{13}$ ) و  $Fe_2Al_5$  هستند. به علاوه، مناطق فاز غنی از آلومینیوم و مناطق بین‌دندریتی غنی از روی به نسبت ۴:۱ تخمین زده می‌شود. در پوشش گالوالوم، هر دو فاز غنی از روی و ذرات سیلیسیم در بافت بین‌دندریتی مشاهده می‌شوند. این پوشش از دندریت‌های غنی از آلومینیوم با ۸۱ تا ۸۴ درصد آلومینیوم و ۱۷ تا ۱۹ درصد روی تشکیل شده است. فاز روی در مرکز منطقه بین دندریتی ترکیبی شامل ۶ تا ۱۱ درصد آلومینیوم و ۸۹ تا ۹۴ درصد روی دارد. منطقه یوتکتیک روی-آلومینیوم شامل تقریباً ۳۳ تا ۴۷ درصد آلومینیوم و ۵۲ تا ۶۷ درصد روی و تا ۱ درصد سیلیسیم است [۱۰].

با توجه به میکروآنالیز ناحیه سطحی ورق گالوالوم، شکل ۳-ب، نمونه مورد بررسی شامل ۴۴/۹ درصد وزنی آلومینیوم، ۴۶/۹ درصد وزنی روی و ۱/۷ درصد سیلیسیم است که ترکیب رایج پوشش گالوالوم محسوب می‌شود. به علاوه، با بررسی دقیق‌تر می‌توان دریافت که مناطق دندریتی پوشش، با ترکیب ۸۰ درصد وزنی آلومینیوم و ۱۹/۵ درصد وزنی روی، منطقه غنی از آلومینیوم شناخته می‌شود و مناطق بین دندریتی شامل ۵۶/۸ درصد وزنی آلومینیوم و ۴۲/۲ درصد وزنی روی هستند (شکل ۳-ج) که به عنوان منطقه یوتکتیک Al-Zn شناسایی می‌شوند. فاز یابی الگوی پراش پرتو ایکس ورق گالوالوم و محاسبات درصد فاز نیز نتایج حاصل از میکروآنالیز را تأیید می‌کند.

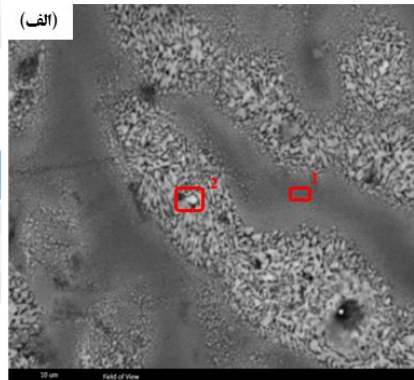
فازهای موجود در پوشش گالوالوم توسط محققین متعددی بررسی شده است. مقطع عرضی ورق گالوالوم شامل



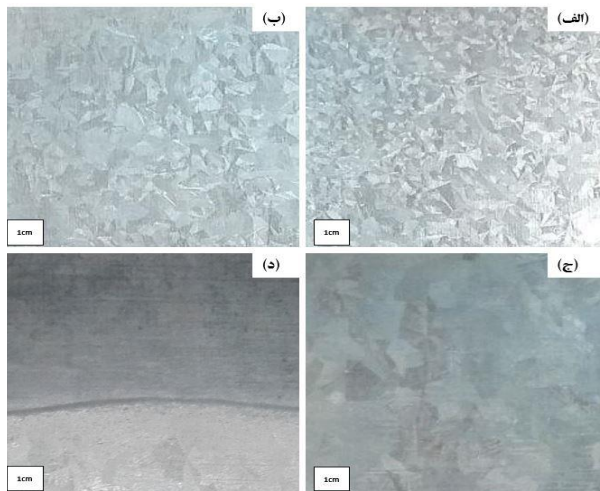
Element	Weight%	Atomic%
Al	80.0	90.6
Fe	0.5	0.3
Zn	19.5	9.1



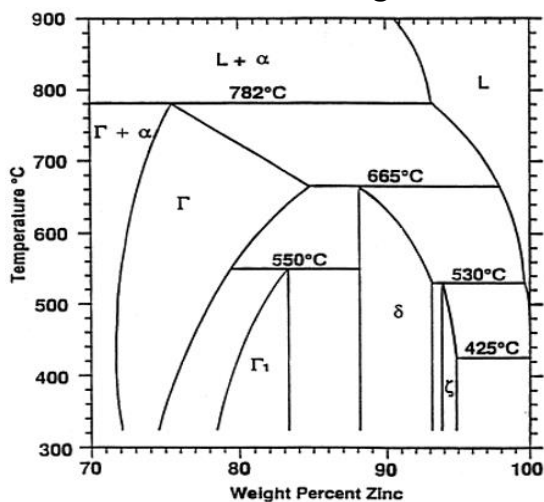
Element	Weight%	Atomic%
Al	56.8	76.1
Fe	1.0	0.6
Zn	42.2	23.3



شکل ۳. (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح ورق گالوانوم، (ب) میکروآنالیز ناحیه ۱، (ج) میکروآنالیز ناحیه ۲.



شکل ۴. پوشش‌های گالوانیزه حرارت داده شده در، (الف) ۳۰۰، (ب) ۳۵۰، (ج) ۳۷۵، (د) ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.



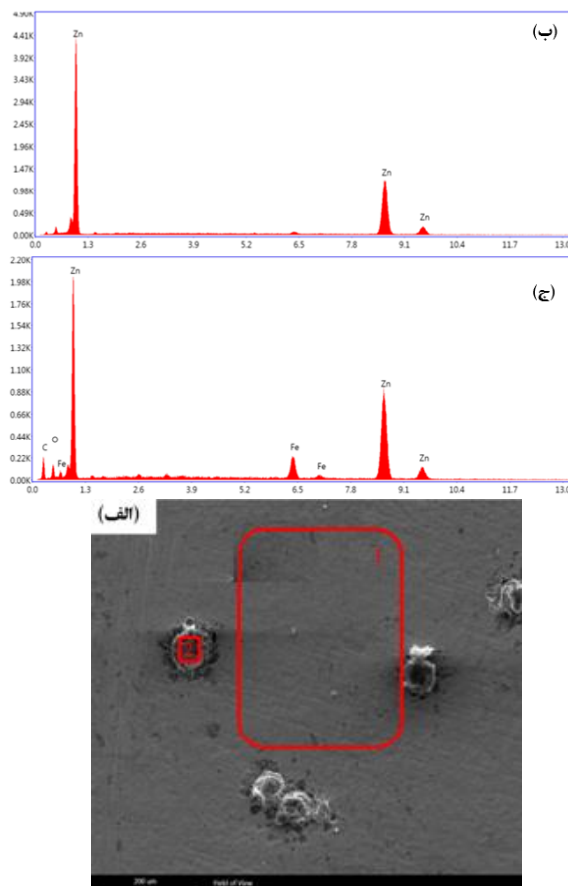
شکل ۵. گوشه غنی از روی نمودار فازی دوتایی Fe-Zn [۱].

### تأثیر حرارت دادن طولانی مدت بر ساختار و آنالیز پوشش‌ها

مشاهده ظاهری سطح پوشش‌ها نشان داد که ورق گالوانیزه Z300 در شکل ۴ تغییر محسوسی نسبت به ورق گالوانیزه تازه تولید نداشته است؛ این امر با نمودار فازی شکل ۵ تطابق دارد. با توجه به شکل ۴-ب سطح ورق Z350 نسبت به ورق گالوانیزه ناهموارتر و کدرتر شده که بیانگر تغییر احتمالی در ساختار و یا ترکیب پوشش، و یا اکسید شدن سطح پوشش است. با توجه به تصویر SEM، شکل ۶، برآمدگی‌های کمی روی سطح مشاهده می‌شود که با میکروآنالیز آنها عناصر روی، آهن، اکسیژن و کربن شناسایی شد (شکل ۶-ج)، درحالی‌که در آنالیز EDS از سطح بدون برآمدگی ۱۰۰٪ روی مشاهده شد (شکل ۶-ج) که احتمال داده می‌شود در مناطق برجسته آهن زیرلایه به پوشش روی نفوذ کرده و تشکیل ترکیب بین فلزی داده باشد. شایان ذکر است که اطلاعات EDS از عمق کم (درحد امیکرون) برمی‌آید و درصد کم عناصر را نیز شناسایی می‌کند، اما XRD تا عمق بیشتری (درحد ۱۰ میکرون) مؤثر است و به این دلیل آهن زیرلایه را هم شناسایی می‌کند.

شد، این امر نشان می‌دهد که در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد ترکیب بین‌فلزی  $FeZn_{15}$  ایجاد شده که در توافق با دیاگرام فازی Fe-Zn است. از طرفی با توجه به دمای بالای کوره و اکسید شدن سریع آلومینیوم ایجاد اکسید قابل انتظار است، به این صورت که با در معرض قرارگرفتن لایه بین فلزی Fe-Al ترکیب بین فلزی  $FeZn_{15}$  تشکیل شده و آلومینیوم شروع به اکسید شدن می‌کند؛ نتایج حاصل از آنالیز EDS نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

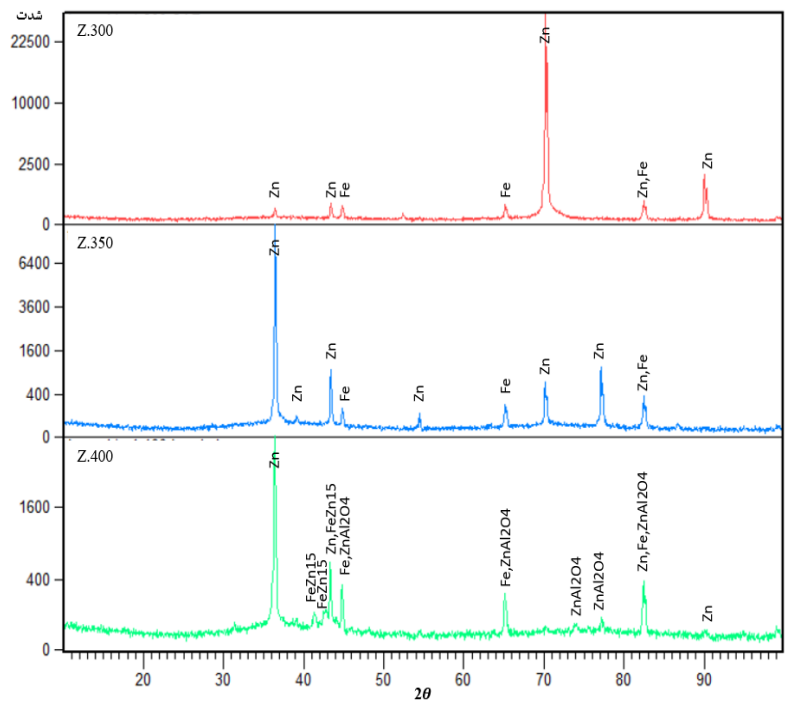
در تصویر SEM نمونه Z400 (شکل ۸)، میزان برآمدگی‌های سطح بسیار زیاد شده و در بعضی مناطق رنگ سطح مات شده است. با توجه به میکروآنالیز سطح و برآمدگی آن، شناسایی آهن، روی، آلومینیوم و اکسیژن بر سطح و همین‌طور شناسایی آهن و روی در مناطق برآمدگی، می‌توان گفت روی موجود در پوشش با آهن زیرلایه که در پوشش نفوذ کرده است تشکیل ترکیب بین فلزی Fe-Zn می‌دهد؛ لایه بین فلزی حاوی آلومینیوم در معرض قرار می‌گیرد و با اکسیژن هوا ایجاد اکسید می‌کند، به همین علت سطح کدر می‌شود.



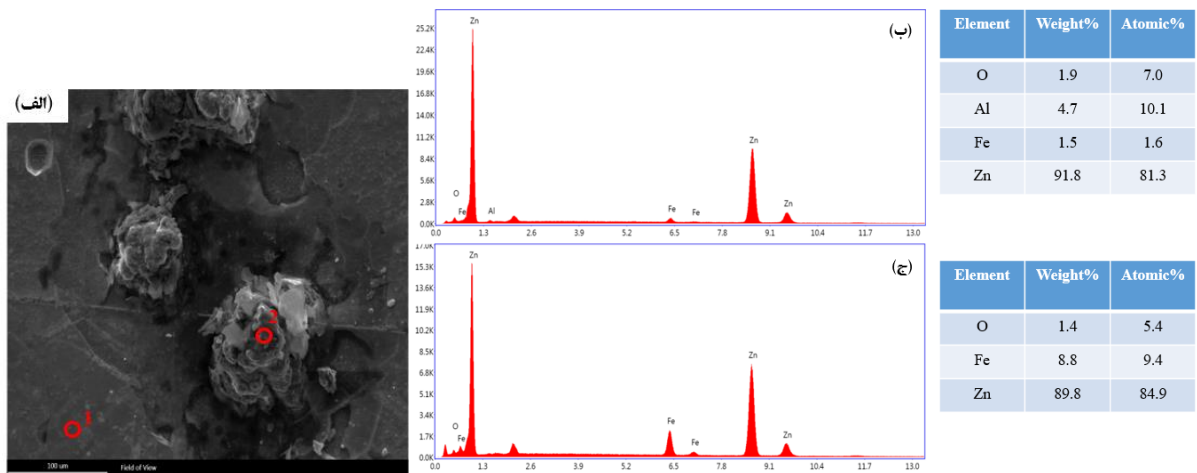
شکل ۶. (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه Z350 (ب) میکروآنالیز EDS ناحیه ۱، (ج) میکروآنالیز EDS ناحیه ۲.

در الگوی پراش ورق گالوانیزه حرارت داده شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۷)، علاوه بر آهن و روی، ترکیب بین فلزی  $FeZn_{15}$  و اکسید دوگانه  $ZnAl_2O_4$  نیز مشاهده





شکل ۷. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های گالوانیزه حرارت داده شده.



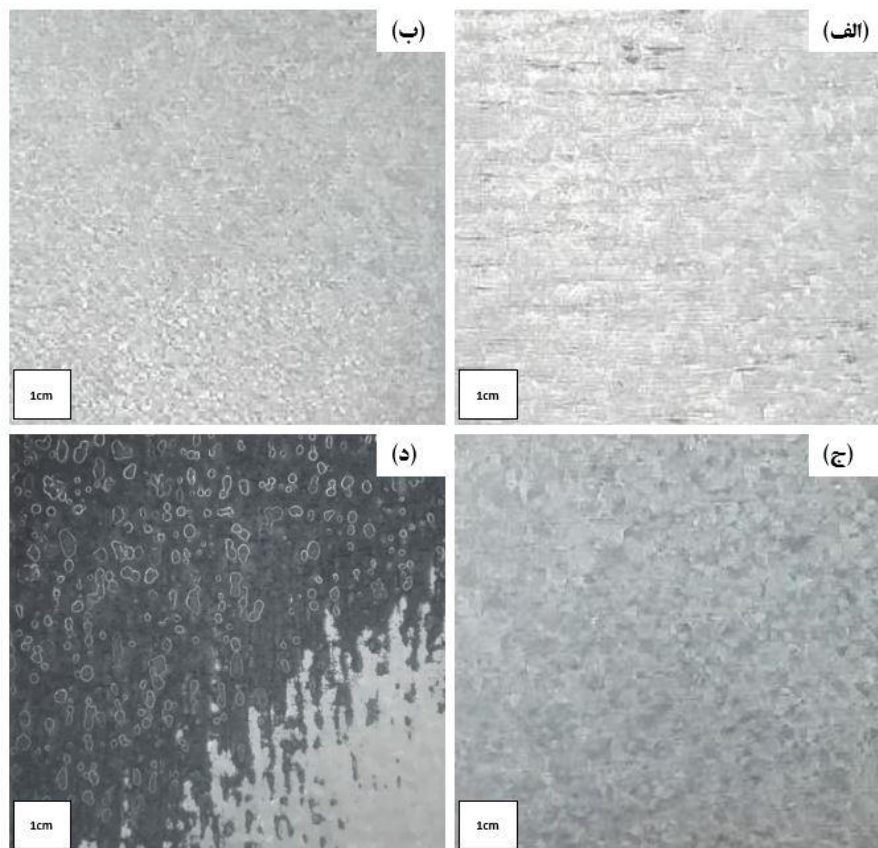
شکل ۸. (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه Zn400، (ب) میکروآنالیز EDS نقطه ۱، (ج) میکروآنالیز EDS نقطه ۲.

آنالیز EDS ورق گالوانوم حرارت داده شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بر اثر حرارت‌دهی برآمدگی‌هایی روی سطح ایجاد شده است که با چشم غیر مسلح نیز قابل مشاهده هستند (شکل ۹ (د)). کل سطح و برجستگی‌های سطحی توسط آنالیز EDS مورد بررسی قرار داده شد. میکروآنالیز سطح ۶/۱ درصد

با حرارت دادن ورق گالوانوم در دماهای بالا مشاهده شد که سطح ورق تغییر ظاهری قابل توجهی نداشته است، تنها کمی سطح کدر شده که با افزایش دمای حرارت دادن نمایان‌تر است (شکل ۹ (الف) تا (ج)). در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد درخشندگی سطح از بین رفته و برجستگی‌هایی روی سطح پدید آمده است. شکل ۱۰ تصویر SEM و

سیلیسیم و ۱۴/۵ درصد آهن شناسایی شد که مشخص است که در این مناطق میزان آلومینیوم، سیلیسیم و آهن بیشتر شده است.

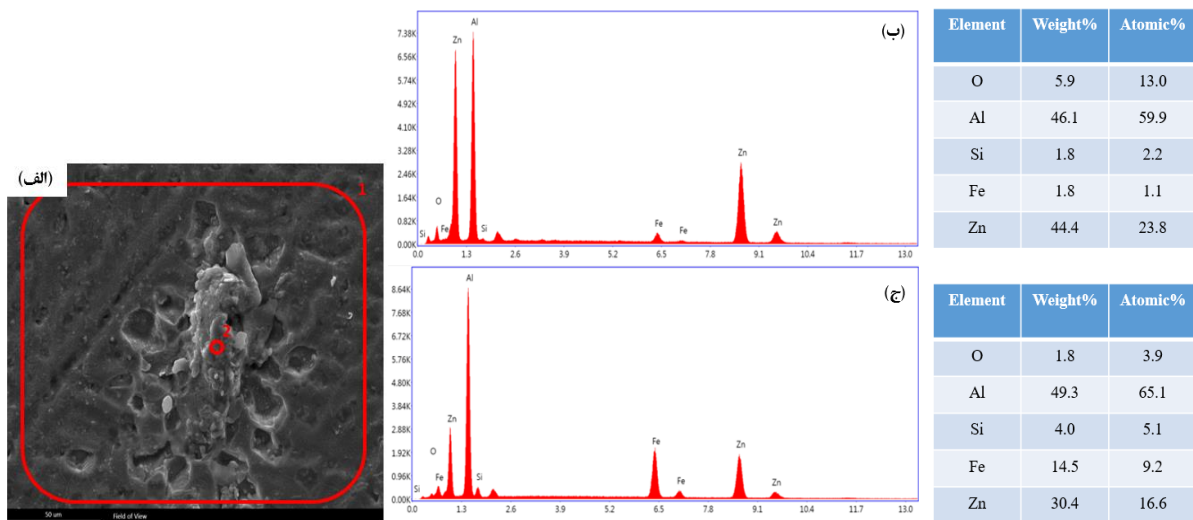
آلومینیوم، ۴۴/۴ درصد روی، ۱/۸ درصد سیلیسیم و ۱/۸ درصد آهن نشان داد، در صورتی که در EDS نقاط برجسته ۴۹/۳ درصد آلومینیوم، ۳۰/۴ درصد روی، ۴/۰ درصد



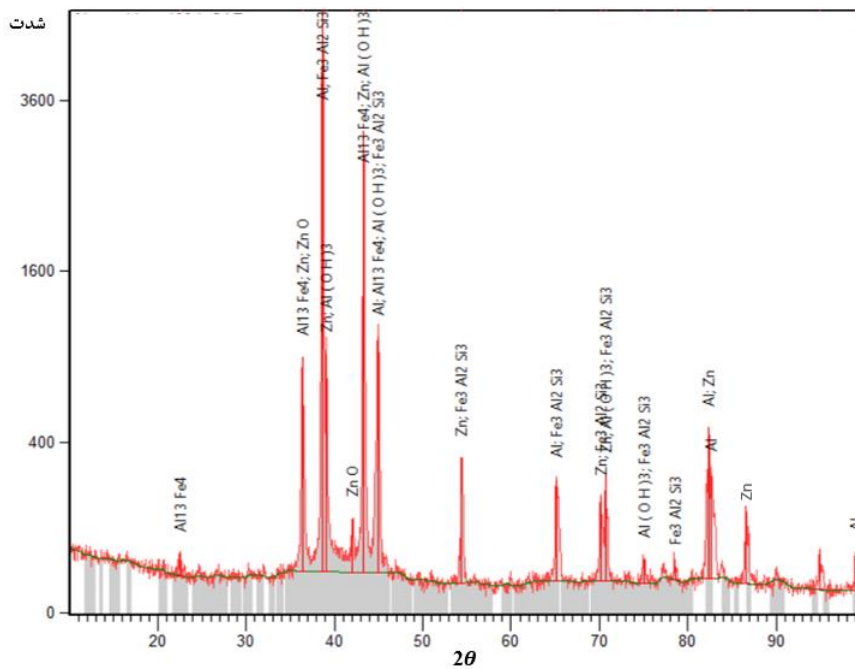
شکل ۹. نمونه‌های گالوالوم حرارت داده شده در، (الف) ۳۰۰، (ب) ۳۵۰، (ج) ۳۷۵، (د) ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.

ترکیب بین فلزی  $Fe_3Al_2Si_3$  مربوط به این نقاط باشد. به‌علاوه در الگوی XRD مقدار کمی اکسید روی قابل مشاهده است که با اکسیژن شناسایی شده در آنالیز EDS مطابقت دارد و همین عامل می‌تواند دلیل کدر شدن سطح براق گالوالوم باشد.

همانطور که در الگوی XRD نمونه AZ400 مشاهده می‌شود (شکل ۱۱) علاوه بر آلومینیوم، روی و ترکیب بین فلزی  $Al_{13}Fe_4$ ، که در نمونه AZ نیز وجود داشت، ترکیب بین فلزی جدید  $Fe_3Al_2Si_3$  نیز تشکیل شده است؛ آلومینیوم و سیلیسیم در پوشش وجود دارند و آهن از زیرلایه به پوشش نفوذ کرده و ترکیب بین فلزی تشکیل داده است. با توجه به درصد عناصر آلومینیوم، سیلیسیم و آهن در آنالیز EDS نقاط برجسته، احتمال داده می‌شود که



شکل ۱۰. (الف) تصویر SEM نمونه AZ400، (ب) آنالیز ناحیه ۱، (ج) آنالیز نقطه ۲.



شکل ۱۱. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه AZ400.

## ۲- خواص مکانیکی پوشش‌ها

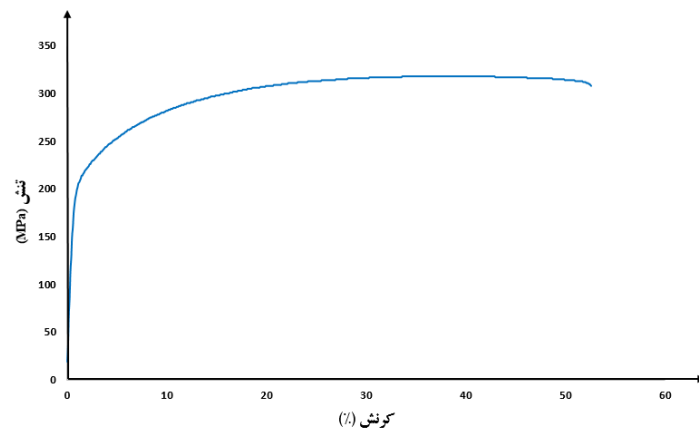
### ورق فولاد بدون پوشش

شکل ۱۲ نمودار تنش بر حسب کرنش ورق فولادی را نشان می‌دهد که بر اساس آن می‌توان استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، استحکام شکست و درصد ازدیاد طول را محاسبه کرد. خواص مکانیکی ورق فولادی در جدول ۳ آورده شده است؛ استحکام تسلیم نسبتاً کم این

در این بخش از پژوهش خواص مکانیکی از جمله سختی، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، استحکام شکست و درصد ازدیاد طول برای ورق فولاد بدون پوشش، پوشش‌های تازه تولید و پوشش‌هایی که به مدت طولانی در معرض گرما قرار داده شدند مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

فولاد با حدود ۰/۰۵ درصد وزنی کربن در تحقیقات قبلی و آزمون‌های انجام شده براساس استاندارد 50114 DIN، استحکام تسلیم ۱۶۸ مگاپاسکال، استحکام کششی نهایی ۳۱۶ مگاپاسکال و ازدیاد طول نسبی در محدوده ۴۰ تا ۵۰٪ گزارش شده است [۱۲].

فولاد با انعطاف‌پذیری بالای آن هماهنگی دارد، اختلاف زیاد بین نقطه تسلیم و نقطه ماکزیمم نمودار تنش کرنش نیز بیانگر شکل‌پذیری قابل توجه این آلیاژ است. ترکیب شیمیایی ورق فولادی نشان می‌دهد که در گروه فولادهای بسیار کم کربن قرار گرفته و استحکام تسلیم آن در محدوده استاندارد است [۱۱]. گستره مجاز خواص مکانیکی برای



شکل ۱۲. نمودار تنش-کرنش ورق فولاد زیرلایه (نمونه S).

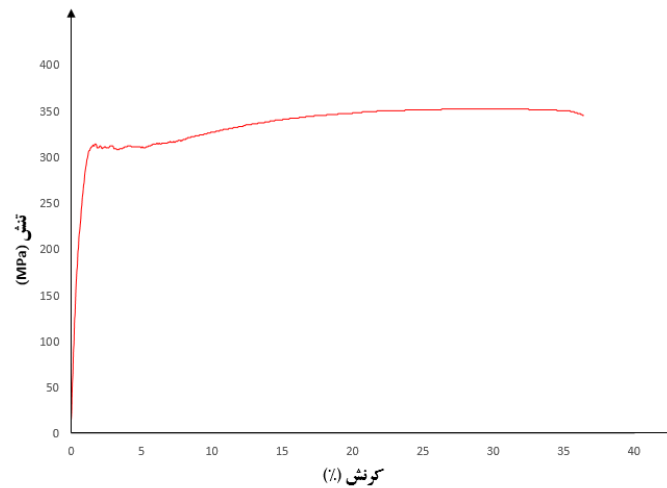
جدول ۳. خواص مکانیکی ورق فولاد زیرلایه (نمونه S)

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام شکست (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)	سختی (ویکرز)
S	۲۰۰	۳۱۸	۳۰۹	۵۲	۱۹۱

به‌دست آمد. جدول ۴ مقادیر خواص مکانیکی ورق را نشان می‌دهد. طبق استاندارد 653M ASTM A مقادیر استحکام تسلیم بیش از ۲۳۰ مگاپاسکال، استحکام کششی بیش از ۳۱۰ مگاپاسکال و ازدیاد طول نسبی بیش از ۲۰٪ گزارش شده است که در توافق با مقادیر به‌دست آمده برای ورق مورد بررسی در این پژوهش است.

#### پوشش‌های تازه تولید

با توجه به نمودار تنش-کرنش ورق گالوانیزه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، این ورق دارای استحکام تسلیم ۳۰۸ مگاپاسکال، استحکام کششی نهایی ۳۵۲ مگاپاسکال، استحکام شکست ۳۴۵ مگاپاسکال و ازدیاد طول نسبی ۳۶٪ است، سختی ورق گالوانیزه نیز به‌طور میانگین ۱۲۵ ویکرز



شکل ۱۳. نمودار تنش-کرنش ورق فولاد گالوانیزه (نمونه Z).

جدول ۴. خواص مکانیکی ورق فولاد گالوانیزه (نمونه Z)

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام شکست (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)	سختی (ویکرز)
Z	۳۰۸	۳۵۲	۳۴۵	۳۶	۱۲۵

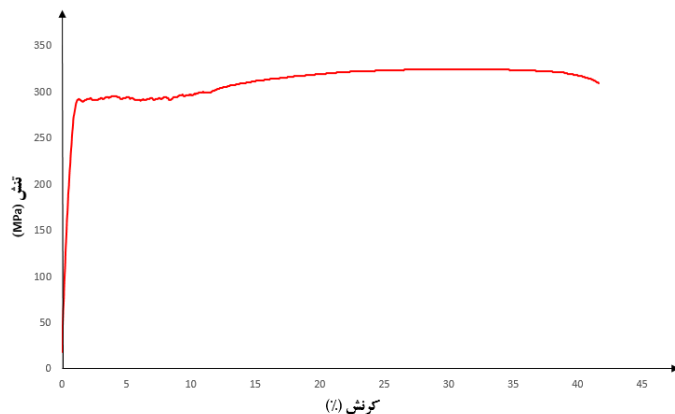
مکانیکی ورق پوشش‌دار بسیار کم است، عبور ورق از خط فرایند گالوانیزه اثرات حرارتی نیز دارد که تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص ورق به جا می‌گذارد.

در شکل ۱۴ نمودار تنش-کرنش ورق گالوالوم نشان داده شده است، طبق محاسبات انجام شده برای ورق گالوالوم استحکام تسلیم ۲۸۳ مگاپاسکال، استحکام کششی نهایی ۳۲۴ مگاپاسکال، استحکام شکست ۳۰۹ مگاپاسکال و ازدیاد طول نسبی ۴۱ درصد است، سختی پوشش نیز به‌طور میانگین ۲۰۰ ویکرز اندازه‌گیری شد. خواص مکانیکی ورق گالوالوم در جدول ۵ آورده شده است. در استاندارد مربوط به خواص مکانیکی ورق گالوالوم مقادیر استحکام و ازدیاد طول نسبی ذکر نشده و مرجعی جهت مقایسه در این مورد وجود ندارد.

با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و استحکام شکست ورق گالوانیزه نسبت به فولاد بدون پوشش افزایش یافته است، درحالی‌که پوشش گالوانیزه سبب کاهش درصد انعطاف‌پذیری ورق فولادی شده است. سختی اندازه‌گیری شده ورق گالوانیزه نیز کمتر است زیرا سختی سنجی روی سطح پوشش انجام می‌گیرد؛ Zn فلز نرمی است و سختی اندازه‌گیری شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سختی سنجی روی سطح گالوانیزه در واقع سختی یک جسم دو لایه را اندازه‌گیری می‌کند که مقادیری بین سختی فولاد و سختی فلز روی را آشکار می‌سازد. مقدار دقیق سختی اندازه‌گیری شده، مشابه کامپوزیت لایه‌ای، به سختی هر یک از لایه‌ها، ضخامت پوشش و مدول الاستیک فولاد و روی بستگی دارد [۱۳]. درحالی‌که پوشش گالوانیزه درصد اندکی از کل ضخامت ورق را تشکیل می‌دهد و تأثیر آن بر خواص

نیز شده است درحالی‌که پوشش گالوانیزه سختی را کاهش داده است. از طرفی ورق گالوانیزه دارای استحکام تسلیم و استحکام کششی بالاتری نسبت به ورق گالوالوم است، درحالی‌که سختی و درصد ازدیاد طول کمتری دارد.

با توجه به مباحث قبل مشاهده می‌شود که هر دو پوشش گالوانیزه و گالوالوم باعث افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی و کاهش ازدیاد طول نسبی ورق فولادی شده‌اند. پوشش گالوالوم سبب افزایش سختی ورق فولادی



شکل ۱۴. نمودار تنش-کرنش ورق فولاد با پوشش گالوالوم (نمونه AZ).

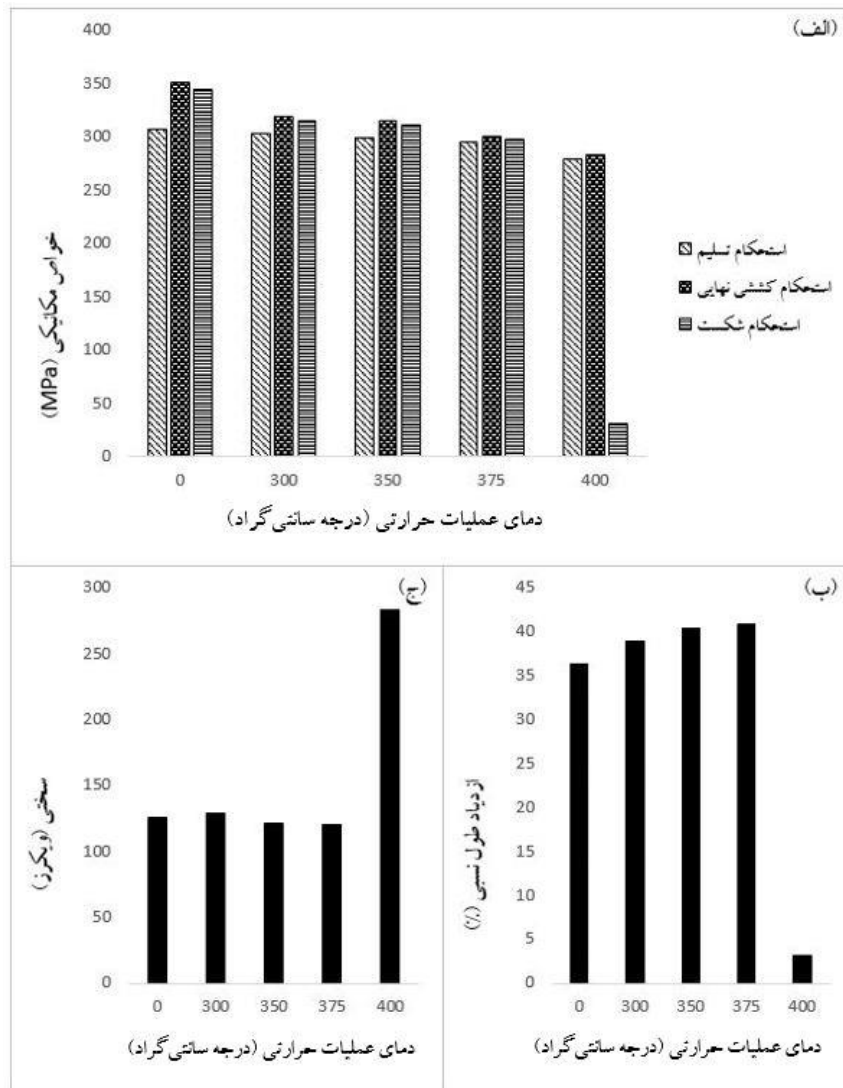
جدول ۵. خواص مکانیکی ورق فولاد با پوشش گالوالوم (نمونه AZ)

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام شکست (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)	سختی (ویکرز)
AZ	۲۸۳	۳۲۴	۳۰۹	۴۱	۲۰۰

است. دلیل افزایش سختی را می‌توان به تشکیل لایه اکسیدی بر سطح پوشش و یا تشکیل فازهای بین فلزی در این محدوده دمایی نسبت داد. از طرفی، مشاهده می‌گردد با حرارت دادن ازدیاد طول نسبی ورق افزایش می‌یابد و با بالا رفتن دمای حرارت‌دهی درصد ازدیاد طول نیز روند افزایشی دارد؛ این روند تا دمای ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد ادامه دارد، اما در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد خیلی سریع به شکست می‌رسد که با سختی ورق در این دما قابل توجیه است و همانطور که گفته شد دلیل آن به تشکیل فازهای ترد Fe-Zn مربوط است.

### تأثیر حرارت دادن طولانی بر خواص مکانیکی

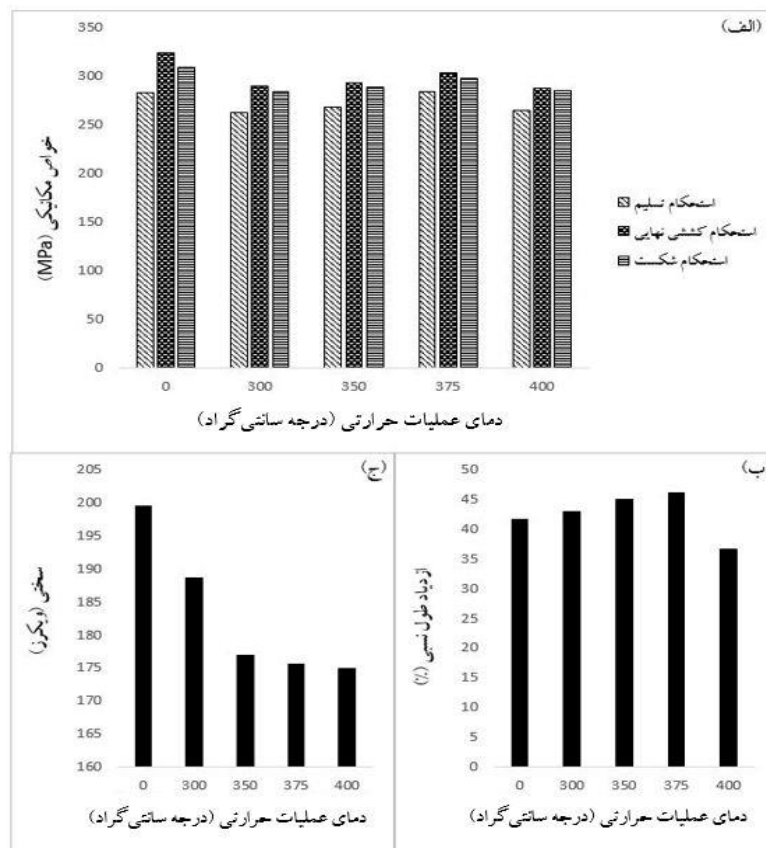
از مقایسه خواص مکانیکی ورق گالوانیزه تازه تولید و ورق‌های گرم‌دیده در دماهای مختلف، شکل ۱۵، مشاهده می‌شود که گرمایش باعث کاهش استحکام تسلیم و استحکام کششی ورق‌های گالوانیزه می‌شود، به علاوه هر قدر دمای حرارت‌دهی بیشتر باشد، این روند کاهش مشهودتر است. سختی ورق نیز بعد از حرارت دادن کاهش یافته و با افزایش دمای حرارت‌دهی میزان کاهش سختی بیشتر شده است، اما در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که سختی به میزان قابل توجهی بالا رفته



شکل ۱۵. مقایسه خواص مکانیکی ورق‌های گالوانیزه تازه تولید و حرارت داده شده، (الف) استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و استحکام شکست، (ب) ازدیاد طول نسبی، (ج) سختی.

سختی را کاهش داده است. از طرفی با بالا رفتن دمای حرارت‌دهی تا دمای ۳۷۵ سانتی‌گراد استحکام تسلیم و ازدیاد طول نسبی همچنان افزایش و سختی کاهش می‌یابد، به‌علاوه استحکام کششی نیز افزایش یافته است.

با توجه به نمودارهای مقایسه خواص مکانیکی ورق گالوانیزه تازه تولید و ورق‌های حرارت‌دهی شده در دماهای مختلف، شکل ۱۶، مشاهده می‌شود که حرارت دادن باعث افزایش استحکام تسلیم و ازدیاد طول نسبی ورق گالوانیزه شده است، اما استحکام کششی نهایی، استحکام شکست و



شکل ۱۶. مقایسه خواص مکانیکی ورق‌های گالوانوم حرارت داده شده، (الف) استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و استحکام شکست، (ب) ازدیاد طول نسبی، (ج) سختی.

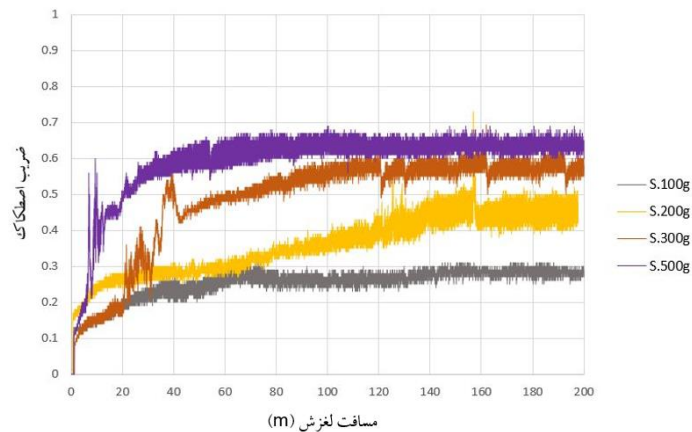
### ۳- خواص تریبولوژیکی پوشش‌ها

#### ورق فولاد بدون پوشش

و دیسک علت بالا رفتن ضریب اصطکاک است. وقتی ذرات از سطح نمونه کنده می‌شوند، با حرکت بین روی دیسک، ذرات در بین پین و دیسک قرار می‌گیرند و مانند آن است که مسیر سایش را شخم می‌زند؛ سطح زبرتر می‌شود و ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. در بار ۳۰۰ گرم پس از طی مسافت ۲۰ متر و در بار ۵۰۰ گرم پس از حدود ۱۰ متر سطح تماس پین و دیسک صدمه دیده و نوساناتی در نمودار ضریب اصطکاک اتفاق افتاده است. در این شرایط، ذرات سایش در سطح تماس وارد شده و میانگین ضریب اصطکاک را، متناسب با شدت سایش، افزایش داده‌اند.

با توجه به شکل ۱۷ که تغییرات اصطکاک ورق فولاد بدون پوشش را نشان می‌دهد، در بار ۱۰۰g فولاد دارای ضریب اصطکاک حدود ۰/۳ است، اما در بار ۲۰۰g ضریب اصطکاک پس از طی مسافت حدود ۷۰ متر به ۰/۴۵ می‌رسد و در بارهای ۳۰۰g و ۵۰۰g ضریب اصطکاک به ترتیب از مرز ۰/۵۵ و ۰/۶۵ می‌گذرد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش بار، ضریب اصطکاک افزایش یافته است؛ تغییر نقطه تماس به دلیل زبر شدن سطح و احتمالاً کنده شدن ذرات از سطح و فرارگرفتن در بین پین





شکل ۱۷. تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش ورق فولاد بدون پوشش (نمونه S).

### پوشش‌های تازه تولید

همانطور که در نمودار اصطکاک ورق گالوانیزه، شکل ۱۸ (الف)، دیده می‌شود در بار  $50g$ ، تا مسافتی که پوشش تخریب نشده، ضریب اصطکاک حدود  $0/1$  است که از ضریب اصطکاک فولاد بدون پوشش کمتر است. در بار  $50g$ ، پوشش تا مسافت حدود  $120$  متر دوام داشته و بعد از آن تخریب شروع شده است، در این حالت ضریب اصطکاک به حدود  $0/18$  رسیده که همچنان کمتر از ضریب اصطکاک فولاد است.

با افزایش بار تا  $100g$  ضریب اصطکاک پوشش به  $0/15$  رسیده و تا مسافت حدود  $130$  متر دوام داشته است، بعد از طی این مسافت و تخریب پوشش، ضریب اصطکاک به حدود  $0/27$  رسیده است (شکل ۱۸ (ب)). پوشش گالوانیزه در بار  $200g$  تا مسافت حدود  $20$  متر دوام داشته و دارای ضریب اصطکاک حدود  $0/19$  است، سپس پوشش تخریب شده و ضریب اصطکاک به حدود  $0/4$  رسیده است (شکل ۱۸ (ج)). در بارهای  $300g$  و  $500g$  پوشش از همان ابتدا، پس از مسافتی اندک، تخریب شده و به زیرلایه رسیده است، در این شرایط ضریب اصطکاک به حدود  $0/45$  رسیده است.

در آزمون پین روی دیسک، با افزایش بار ضریب اصطکاک پوشش افزایش می‌یابد و باعث کاهش عمر پوشش

می‌شود؛ این پدیده به دلیل نرم بودن پوشش گالوانیزه است که باعث می‌شود با افزایش بار تغییر شکل پلاستیکی و یا لهیدگی بیشتری در پوشش ایجاد گردد، پین در لهیدگی‌ها گیر می‌افتد و سرعت حرکت آن کند می‌شود، در نتیجه ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد؛ البته این پدیده تنها در مورد پوشش‌های نرم صادق است و در پوشش‌های سخت کم‌تر اتفاق می‌افتد. از طرفی در بارهای کم،  $50$  و  $100$  گرم، بعد از تخریب پوشش هم ضریب اصطکاک کمتر از ضریب اصطکاک فولاد است در حالی که در بار  $200$  گرم و بیشتر ضریب اصطکاک به بالاتر از ضریب اصطکاک فولاد می‌رسد. به این ترتیب می‌توان گفت که پوشش گالوانیزه مورد مطالعه با ضخامت  $9$  میکرون در بیشتر از  $100$  گرم بارپذیری کافی ندارد، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد و پوشش به‌طور کامل تخریب می‌شود. بارپذیری پوشش که عملکرد آن را هنگام اعمال تنش تعیین می‌کند، علاوه بر ضخامت به چسبندگی پوشش و خواص مکانیکی آن نیز بستگی دارد.

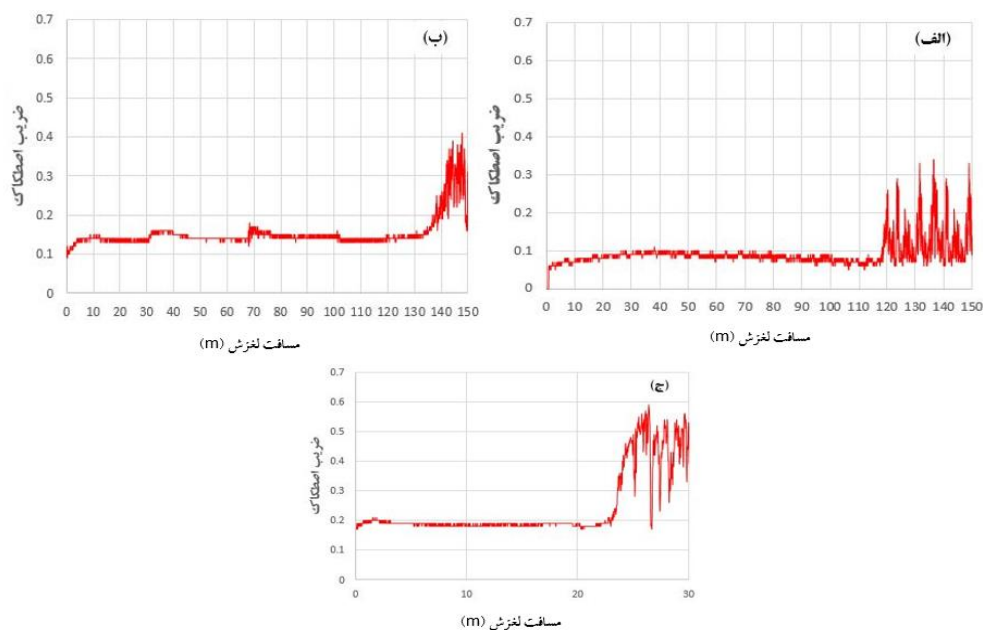
شکل ۱۹ تصاویر میکروسکوپی نوری مسیر سایش را نشان می‌دهد؛ مشخص است که در هر سه بار  $50$ ،  $100$  و  $200$  گرم در پوشش کندگی ایجاد شده اما سایش به زیرلایه نرسیده است. از طرفی در هر سه تصویر حالت کندگی و شخم زدگی در مسیر سایش دیده می‌شود. همانطور که گفته شد ذراتی که از سطح پوشش کنده می‌شوند در بین

درصد زیاد آهن بدیهی است که بخش عمده پوشش تقریباً از بین رفته و یا نازک شده است و سطح آن نیز در مسیر سایش به دلیل افزایش دما اکسید شده است.

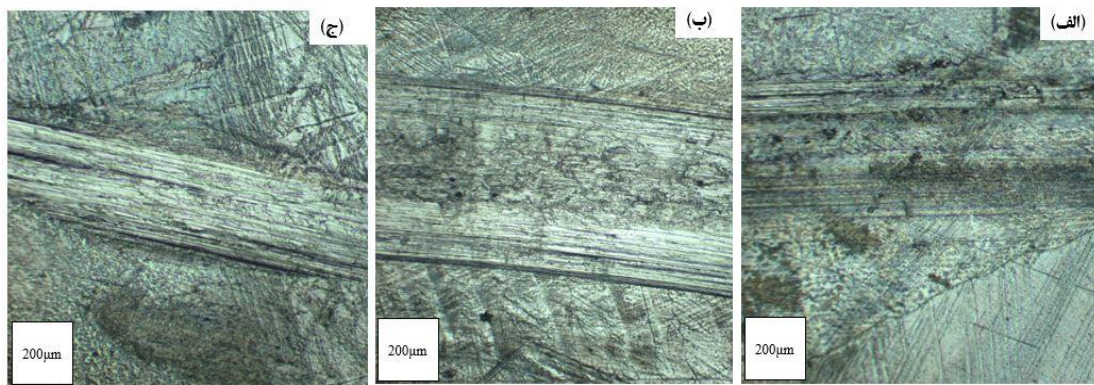
در شکل ۲۱ میکروآنالیز ذرات حاصل از آزمون پین روی دیسک پوشش گالوانیزه نشان داده شده است که شامل ۹۸/۵ درصد روی و ۱/۵ درصد اکسیژن است. کاملاً مشخص است که طی لغزش پین فولادی بر سطح پوشش، اکسیداسیون اتفاق افتاده و ذرات اکسید شده از سطح پوشش کنده شده است. با توجه به آنالیز EDS پین ساینده، شکل ۲۲، که ۱۳ درصد آهن، ۸۴ درصد روی و ۳ درصد اکسیژن نشان داد، می‌توان نتیجه گرفت که ذرات کنده شده از سطح پوشش به پین چسبیده‌اند؛ این شرایط نشان می‌دهد که ذرات از جسم نرم‌تر کنده شده و به جسم سخت‌تر چسبیده است که وجود مکانیزم سایش چسبان را تأیید می‌کند.

پین و دیسک قرار گرفته و پس از کارسخت شدن روی سطح ایجاد خراش می‌کنند. بنابراین می‌توان گفت سایش پوشش گالوانیزه با مکانیزم خراشان صورت گرفته که در بارهای ۵۰ و ۱۰۰ گرم خیلی کم است.

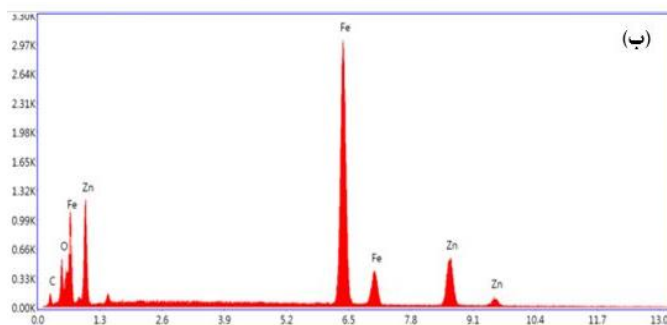
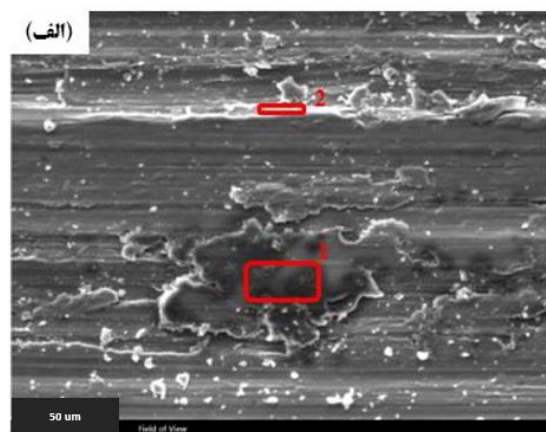
جهت تشخیص دقیق‌تر مکانیزم تخریب، مسیر سایش و پودر حاصل از سایش سطح گالوانیزه و پین مورد استفاده در بار ۲۰۰g و مسافت ۲۰۰ متر توسط SEM و EDS مورد آنالیز قرار گرفتند. همانطور که در شکل ۲۰ (الف) مشاهده می‌گردد در مسیر سایش علاوه بر حالت شخم زدگی، ذرات چسبیده به سطح و نواحی اکسید شده نیز مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد مکانیزم سایش برای پوشش گالوانیزه، در بار ۲۰۰ گرم، از نوع خراشان و چسبان باشد. آنالیز EDS از ذرات چسبیده به سطح ۶۷ درصد آهن، ۳۰ درصد روی و بیش از ۲ درصد اکسیژن را نشان داد. آنالیز EDS ناحیه ۲ در تصویر نیز ۸۷ درصد آهن، ۱۲ درصد روی و ۱ درصد اکسیژن نشان داد که با توجه به



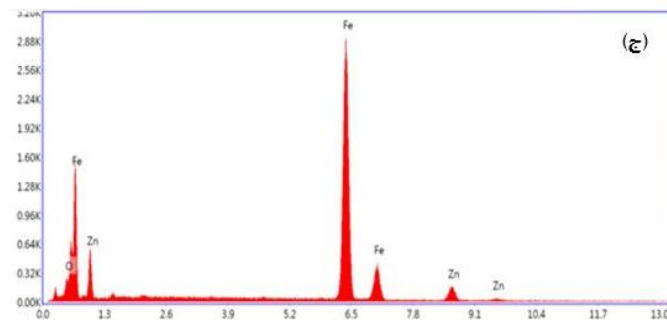
شکل ۱۸. تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش پوشش گالوانیزه، (الف) ۵۰g، (ب) ۱۰۰g، (ج) ۲۰۰g.



شکل ۱۹. تصاویر مسیر سایش روی سطح پوشش گالوانیزه در بار عمودی؛ (الف) ۵۰ g، (ب) ۱۰۰ g، (ج) ۲۰۰ g.

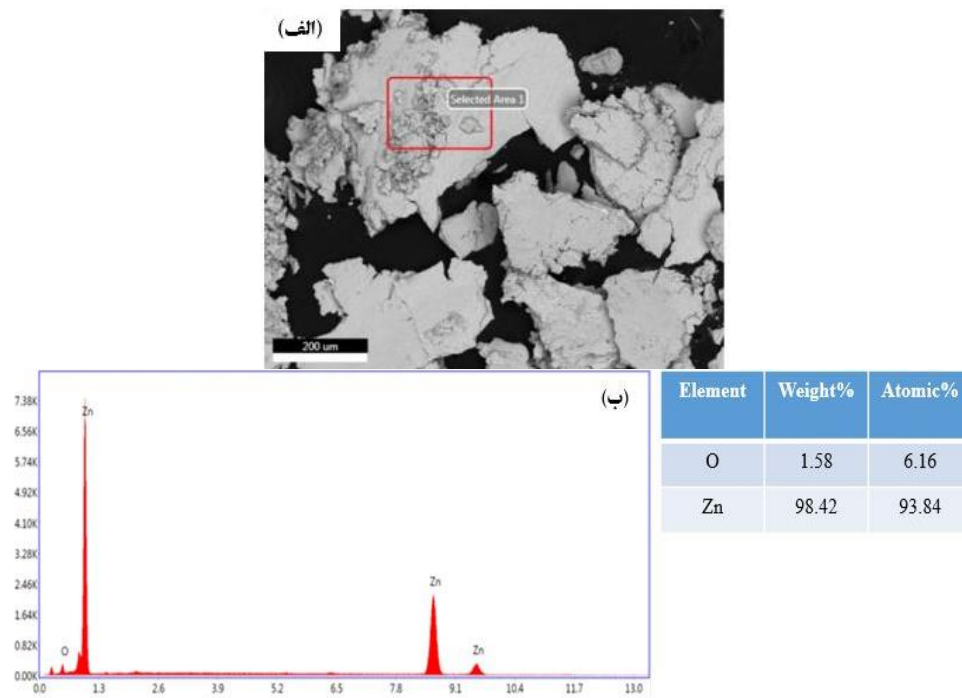


Element	Weight%	Atomic%
C	0.04	0.19
O	2.41	8.26
Fe	67.12	65.99
Zn	30.44	25.56

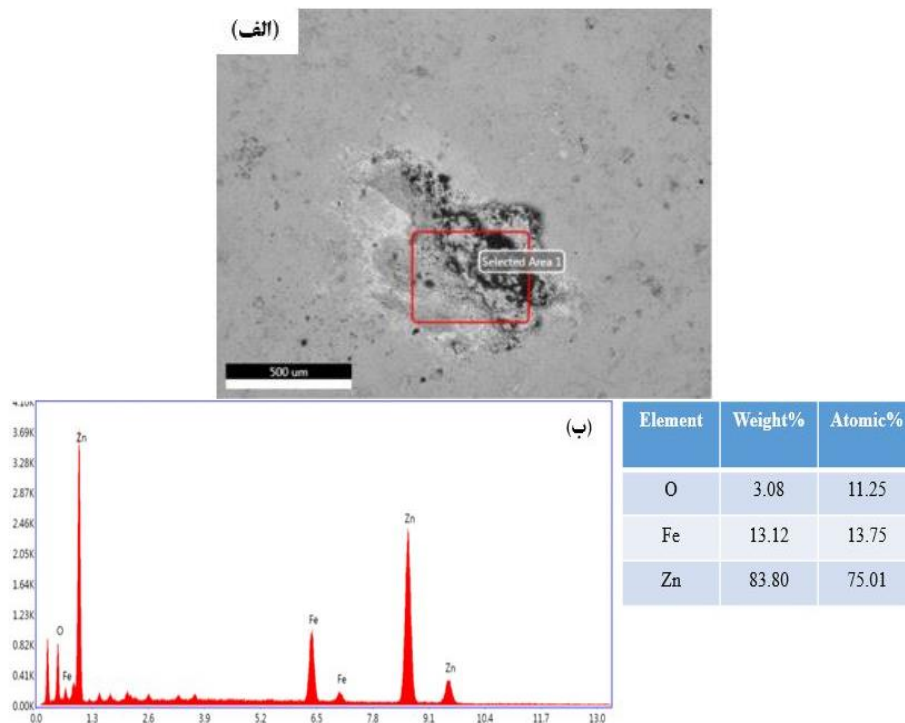


Element	Weight%	Atomic%
O	1.07	3.69
Fe	87.36	86.52
Zn	11.57	9.79

شکل ۲۰. ریزساختار مسیر سایش پوشش گالوانیزه در بار ۲۰۰ g، (ب) میکروآنالیز ناحیه ۱، (ج) میکروآنالیز ناحیه ۲.



شکل ۲۱. (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی براده‌های سایش پوشش گالوانیزه در بار ۲۰۰g، (ب) میکروآنالیز ذره سایش.



شکل ۲۲. (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی بین فولادی بعد از سایش پوشش گالوانیزه در بار ۲۰۰g، (ب) میکروآنالیز ذره چسبیده به سطح بین.

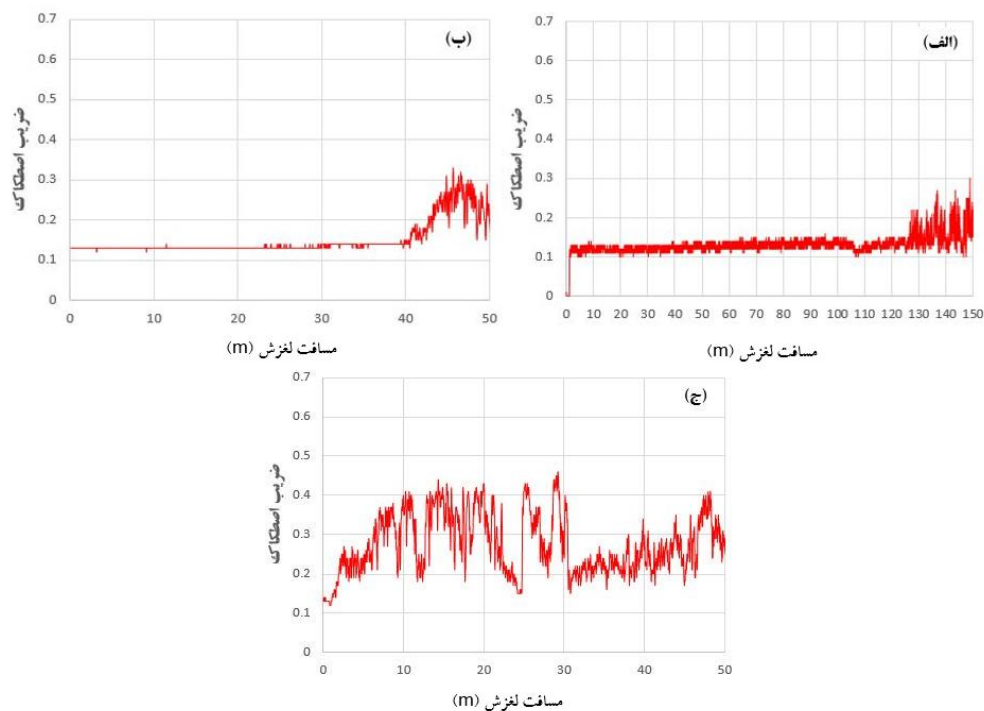
با توجه به نمودار اصطکاک ورق گالوانوم که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، ضریب اصطکاک پوشش گالوانوم در ۵۰ گرم و قبل از تخریب پوشش حدود ۰/۱۲ است، پوشش تا مسافت حدود ۱۳۰ متر دوام داشته و بعد از

پوشش تا مسافت حدود ۱۳۰ متر دوام داشته و بعد از

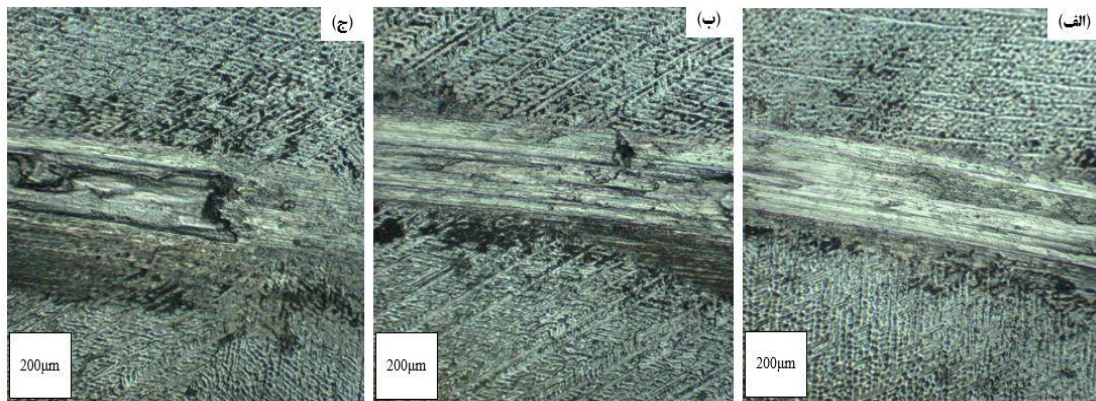
مکانیزم‌های سایش خراشان و سایش چسبان را می‌توان در مورد پوشش AZ بیان کرد که در سایش با بار ۲۰۰ گرم مشهود است. جهت تأیید موارد مذکور در رابطه با مکانیزم سایش، به‌عنوان نمونه، مسیر سایش و ذرات حاصل از سایش گالوالوم و پین مورد استفاده برای آزمون با بار ۲۰۰gF و در مسافت ۲۰۰ متر توسط SEM و EDS مورد آنالیز قرار گرفتند. در میکروآنالیز مسیر سایش پوشش گالوالوم که در شکل ۲۵ نشان داده شده است ۲۳ درصد آهن، ۳۷ درصد روی، ۳۱ درصد آلومینیوم، ۶ درصد اکسیژن و ۳ درصد سیلیسیم آشکار شد. با توجه به میزان قابل توجه آهن در این ناحیه، می‌توان گفت پوشش گالوالوم در بار ۲۰۰ گرم تخریب شده و به زیرلایه رسیده است. از طرفی با توجه به میزان اکسیژن موجود، که بیش از مقدار اکسیژن شناسایی شده در پین ساینده است، در حین سایش مقداری اکسیژن جذب پوشش شده و ایجاد اکسید کرده است. بنابراین می‌توان گفت پوشش گالوالوم بارپذیری لازم برای کار در بار ۲۰۰ گرم را ندارد.

تخریب، ضریب اصطکاک به حدود ۰/۱۸ رسیده است. با افزایش بار به ۱۰۰g ضریب اصطکاک پوشش افزایش نیافته و همان ۰/۱۲ است، اما دوام پوشش کمتر شده و در مسافت حدود ۴۰ متر تخریب شده است، بعد از تخریب نیز ضریب اصطکاک به حدود ۰/۲۵ رسیده است که همچنان کمتر از فولاد است. با افزایش بار به ۲۰۰g و بیشتر، پوشش از ابتدای لغزش آسیب می‌بیند و ضریب اصطکاک حدود ۰/۳ را تجربه می‌کند. به این ترتیب می‌توان بیان کرد که پوشش گالوالوم در بارهای بیشتر از ۱۰۰ گرم بارپذیری کافی ندارد و به سرعت تخریب می‌شود.

تصاویر میکروسکوپی اثر سایش در شکل ۲۴ نشان می‌دهد که در هر سه بار ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ گرم سطح پوشش خراشیده شده است؛ در بارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ گرم در برخی نواحی به‌نظر می‌رسد که پوشش کنده شده و ذرات چسبیده به سطح مشاهده می‌شود. با توجه به توضیحات ذکر شده



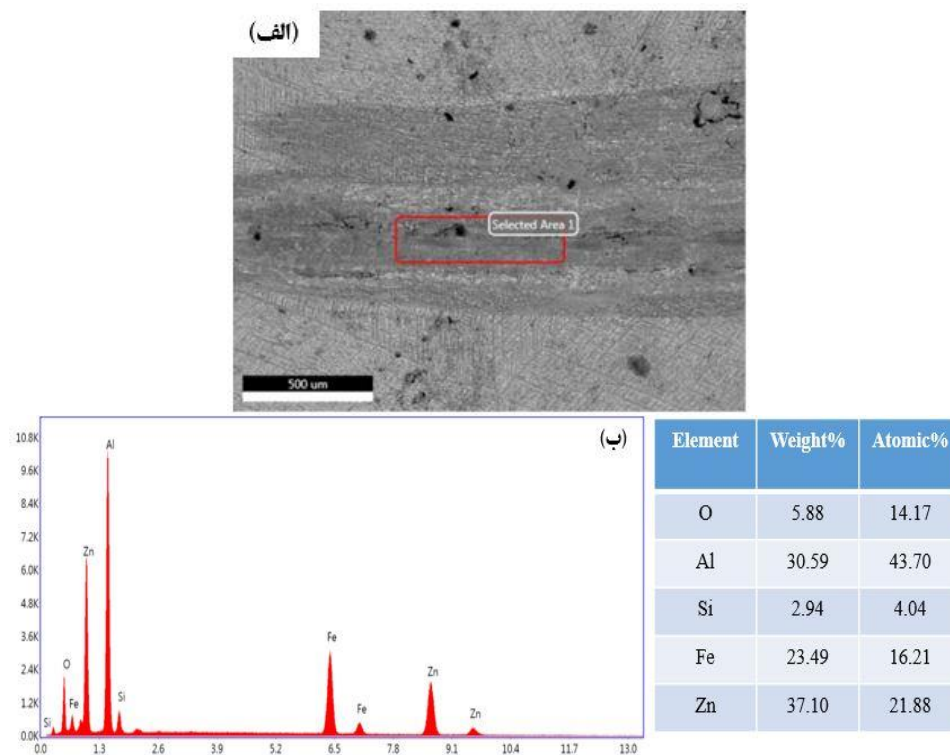
شکل ۲۳. تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش پوشش گالوالوم (نمونه AZ)، (الف) ۵۰g، (ب) ۱۰۰g، (ج) ۲۰۰g.



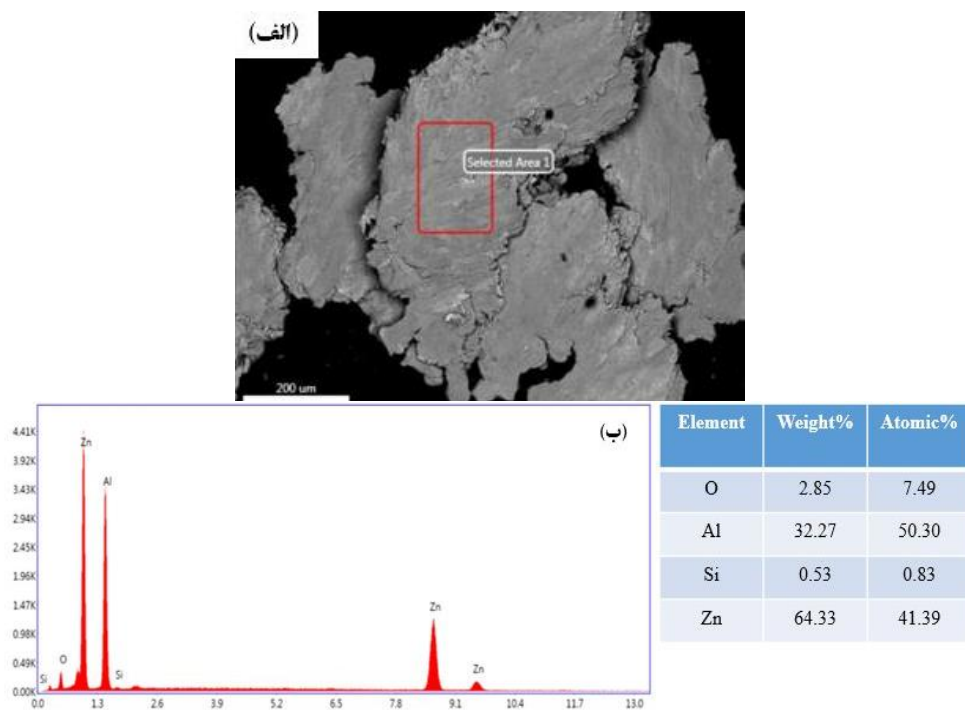
شکل ۲۴. تصاویر اثر سایش پوشش گالوالوم (نمونه AZ) در بار، (الف) ۰.۵g، (ب) ۱.۰g، (ج) ۲.۰g.

ساینده نیز توسط EDS مورد بررسی قرار گرفت؛ مطابق شکل ۲۷ مقدار ۵۵ درصد روی، ۳۸ درصد آلومینیوم، ۲ درصد آهن، ۴ درصد اکسیژن و مقداری سیلیسیم آشکار شده است. با توجه به این آنالیز، ذرات کنده شده از پوشش به پین چسبیده و سایش چسبان باعث تخریب بیشتر پوشش شده است.

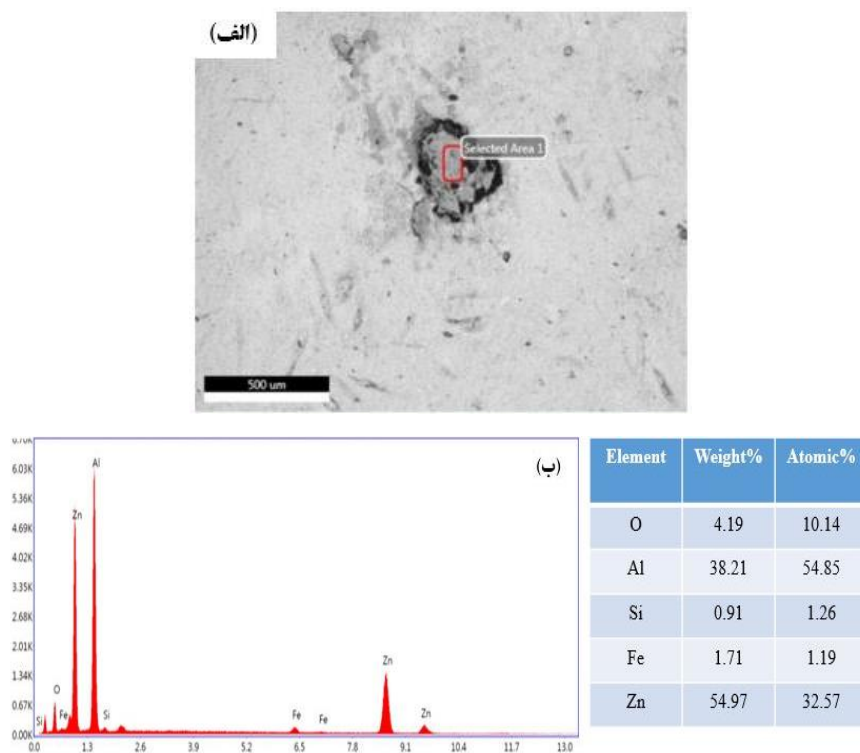
میکروآنالیز براده حاصل از سایش پوشش گالوالوم در شکل ۲۶ نشانگر ۶۴ درصد روی، ۳۲ درصد آلومینیوم، ۳ درصد اکسیژن و مقدار کمی سیلیسیم است. با توجه به عناصر موجود، ذرات حاصل تنها مربوط به پوشش گالوالوم است که از سطح کنده شده و تا حدودی اکسید شده است. پین



شکل ۲۵. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مسیر سایش پوشش گالوالوم (نمونه AZ) در بار ۲.۰g.



شکل ۲۶. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات سایش پوشش گالوالوم (نمونه AZ) در بار ۲۰۰g.

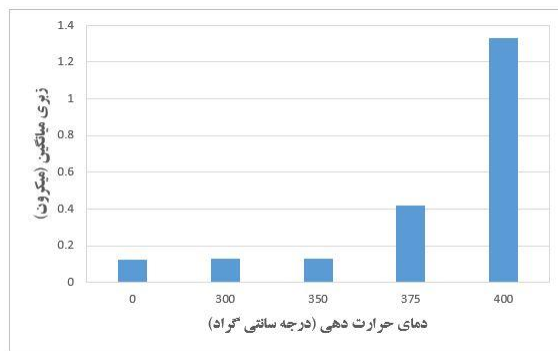


شکل ۲۷. ذره چسبیده به پین ساینده پس از سایش پوشش گالوالوم (نمونه AZ) در بار ۲۰۰ g و میکروآنالیز سطح پین.

شکل ۲۸ میانگین زبری،  $R_a$ ، سطح پوشش گالوانیزه تازه تولید و حرارت داده شده را نشان می‌دهد؛ مشاهده می‌شود که گرمایش سبب افزایش زبری سطح پوشش شده است که با افزایش دما محسوس‌تر نیز شده است. افزایش زبری با ایجاد فاز  $FeZn_{15}$  مرتبط است که موجب برجستگی سطح پوشش شده و تأییدی بر تشکیل این فازها است. در مورد رفتار سایشی پوشش‌های گالوانیزه حرارت دیده می‌توان گفت گرمایش طولانی دو اثر بر رفتار سایشی پوشش داشته است، اول اینکه سبب تشکیل فازهای بین‌فلزی ترد  $Fe-Zn$  شده که به دلیل تردی و تافنس کم، تأثیر منفی بر رفتار پوشش دارد و سبب تخریب زود هنگام پوشش می‌گردد. این حالت در رفتار سایشی نمونه‌های Z300 و Z350 مشهود است؛ با حرارت‌دهی ورق در دماهای مذکور ضریب اصطکاک پوشش گالوانیزه از حدود ۰/۱ به حدود ۰/۱۵ رسیده و عمر پوشش نیز بسیار کم شده است. دوم اینکه در دماهای بالاتر لایه اکسیدی بر سطح پوشش ایجاد می‌شود که به دلیل سختی بالای لایه اکسیدی مقاومت در برابر فرورونده بالا می‌رود و از تخریب پوشش جلوگیری می‌شود. این عامل نیز در رفتار سایشی نمونه‌های Z375 و Z400 قابل مشاهده است؛ در این دماها ضریب اصطکاک به طور یکنواخت و در محدوده ۰/۳ است و پوشش حتی در مسافت‌های طولانی تخریب نمی‌شود.

به عنوان ارزیابی کلی تریبولوژیکی پوشش‌ها می‌توان گفت هر دو پوشش گالوانیزه و گالوالوم بیش از ۱۰۰g بارپذیری ندارند و در بارهای بیشتر خیلی سریع تخریب می‌شوند؛ مکانیزم سایش برای هر دو پوشش از نوع خراشان و چسبان است. در بار ۱۰۰g ضریب اصطکاک فولاد به طور میانگین ۰/۳ و ضریب اصطکاک پوشش گالوالوم و پوشش گالوانیزه، قبل از تخریب کامل، کمتر از فولاد است. از طرفی، قبل از تخریب پوشش ضریب اصطکاک گالوانیزه کمتر از گالوالوم است. با توجه به چسبندگی مشابه هر دو پوشش به زیرلایه، احتمالاً تفاوت ضخامت و مدول الاستیک علت تفاوت در ضریب اصطکاک و دوام کمتر پوشش گالوالوم نسبت به گالوانیزه شده است. مدول الاستیک روی ۱۰۸ GPa و مدول الاستیک آلومینیوم ۷۰ GPa است [۱۴]، با انجام محاسبات، مدول الاستیک پوشش-های گالوانیزه و گالوالوم، به ترتیب، حدود ۱۰۸ GPa و ۸۹ GPa به دست آمد. بارپذیری پوشش گالوالوم از دو جنبه کمتر از گالوانیزه است، اول ضخامت کمتر پوشش و دوم مدول الاستیک کمتر نسبت به گالوانیزه.

### تأثیر گرمایش طولانی بر خواص تریبولوژیکی پوشش‌ها

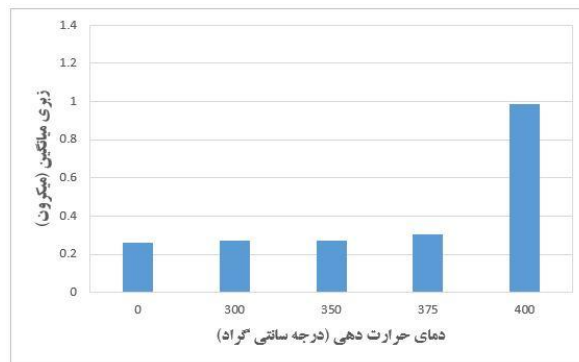


شکل ۲۸. زبری سطح پوشش‌های گالوانیزه تازه تولید و حرارت داده شده.



سانتی‌گراد چندان محسوس نیست. با بالا رفتن دما تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد زبری به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته که با برجستگی‌های سطح پوشش که بر اثر تشکیل فاز  $Fe_3Al_2Si_3$  در این دما ایجاد شده است، تطبیق دارد.

با توجه به شکل ۲۹ که میانگین زبری،  $R_a$ ، سطح پوشش گالوالوم تازه تولید و حرارت داده شده را نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که حرارت‌دهی سبب افزایش زبری سطح پوشش شده است اما این روند افزایشی تا دمای ۳۷۵ درجه



شکل ۲۹. زبری سطح پوشش‌های گالوالوم تازه تولید و حرارت داده شده.

### نتیجه‌گیری

۱- حرارت دهی ورق گالوانیزه تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییری در ساختار و ترکیب ورق ایجاد نمی‌کند اما در دماهای بالاتر ترکیب بین فلزی  $FeZn_{15}$  تشکیل شده و در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد اکسید دوگانه  $ZnAl_2O_4$  بر سطح پوشش ایجاد می‌شود. با حرارت دادن ورق گالوالوم تا دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تغییری در ساختار و ترکیب ورق اتفاق نمی‌افتد، اما در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد ترکیب بین فلزی جدید  $Fe_3Al_2Si_3$  و مقدار کمی اکسید روی تشکیل می‌شود.

۲- فرایندهای گالوانیزه و گالوالوم سبب افزایش استحکام و سختی و کاهش انعطاف پذیری ورق فولادی می‌شوند، به طوری که استحکام تسلیم ورق بدون پوشش ۲۰۰ مگاپاسکال است که پس از پوشش‌دهی به ۳۰۸ و ۲۸۳ مگاپاسکال برای ورق‌های گالوانیزه و گالوالوم می‌رسد اما از دید طول نسبی از ۵۲٪ به ترتیب به ۳۶ و ۴۱٪ رسیده است. از طرفی، گرمایش طولانی برای ورق گالوانیزه تا دمای ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد تغییر محسوسی بر خواص

با بررسی و ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌های گالوالوم می‌توان گفت حرارت‌دهی تا دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد سبب افزایش ضریب اصطکاک و کاهش دوام پوشش گالوالوم می‌شود. با حرارت‌دهی ورق گالوالوم در ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد ضریب اصطکاک، قبل از تخریب پوشش، از ۰/۱۲ به ۰/۱۵ رسیده است و با حرارت‌دهی در ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، پوشش از ابتدا تخریب شده و ضریب اصطکاک به ۰/۳۲ رسیده است؛ اثر منفی حرارت‌دهی تا این دماها را می‌توان به تشکیل فازهای ترد  $Fe-Al$  نسبت داد. در نمونه  $AZ375$  ضریب اصطکاک پوشش حدود ۰/۱۵ ثابت مانده و پوشش تخریب نشده است. در نمونه  $AZ400$  نیز پوشش بر اثر سایش تخریب نمی‌شود اما ضریب اصطکاک بیشتر شده و به ۰/۲۲ رسیده است؛ این افزایش ضریب اصطکاک را می‌توان به زبری بیشتر سطح نسبت داد، از طرفی دوام پوشش در دماهای بالاتر به لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش مربوط می‌شود که به دلیل سختی زیاد بارپذیری بیشتری دارد و از تخریب پوشش جلوگیری می‌کند.

Universite Pierre et Marie Curie – Paris VI, (2012), English.

۶. اشرفی زاده، ف، مشخصه‌های متالورژیکی و مهندسی پوشش‌های آلیاژی روی و آلومینیوم، همایش صنعتی ورق‌های فولادی پوشش‌دار؛ از تولید تا مصرف، ص ۱۲-۱، شهرکرد (۱۳۹۵).

7. Zou, J., Liao, X.Z., Duan, X.F., Durandet, Y., Cockaynet, D.J.H., *TEM study of intermetallic phases in 55Al-Zn coatings*, Microscopy ipen.br-2(1998).

۸. دیترا، ج، شهیدی، ش، متالورژی مکانیکی، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۹۱.

9. Min, T., Gao, Y., Huang, X., Gong, Z., Li, K., Ma, S., *Effects of aluminum concentration on the formation of inhibition layer during hot-dip galvanizing*, International Journal of Heat and Mass Transfer 127 (2018) 394-402.

10. Liu, W., Li, Q., Li, M.C., *Corrosion behaviour of hot-dip Al-Zn-Si and Al-Zn-Si-3Mg coatings in NaCl solution*, Corrosion Science 121 (2017) 72-83.

11. stahlschlüssel Key to Steel.

۱۲. آقابابا، ج، بررسی رفتار شکل‌پذیری ورق‌های فولادی کم کربن، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۷۵).

13. Rickerby, D.S., Bull, S.J., Robertson, T., Hendry, A., *The role of titanium in the abrasive wear resistance of physically vapour-deposited TiN*, Surface and coatings Technology, 41 (1990) 63-74.

14. [https:// en. m. Wikipedia.org/ Elastic properties of the elements.](https://en.m.wikipedia.org/Elastic_properties_of_the_elements)

مکانیکی ورق نداشته است اما در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب شده است که استحکام تسلیم به ۲۸۰ مگاپاسکال و ازدیاد طول نسبی به حدود ۳ درصد برسد. گرمایش طولانی تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ورق گالوالوم تغییر محسوسی بر خواص مکانیکی ورق ندارد.

۳- حرارت دهی ورق گالوانیزه سبب افزایش ضریب اصطکاک پوشش شده است به طوری که ضریب اصطکاک ورق از ۰/۱ به ۰/۱۵ در دماهای ۳۰۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و دوام پوشش نیز کم می‌شود. در دماهای بالاتر، ۳۷۵ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ضریب اصطکاک به ۰/۳ افزایش می‌یابد اما پوشش حتی در مسافت‌های طولانی تخریب نمی‌شود. در رابطه با ورق گالوالوم نیز همین شرایط وجود دارد به طوری که حرارت دهی تا دمای ۳۵۰ سبب افزایش ضریب اصطکاک از ۰/۱۲ به ۰/۱۵ شده و دوام پوشش بسیار کم می‌شود؛ در دماهای بالاتر، ۳۷۵ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ضریب اصطکاک به ترتیب به ۰/۱۵ و ۰/۲۲ رسیده اما پوشش تخریب نشده است. مکانیزم سایش برای هر دو پوشش از نوع چسبان و خراشان است.

## مراجع

1. Marder, A.R., *The metallurgy of zinc-coated steel*, Progress in Materials Science 45 (2000) 191-271.

۲. اشرفی زاده، ف، باطنی، ع، باقری، م، نوایی، م، عباسی، ش، طرقی نژاد، م.ر، تحلیلی بر لایه‌های بین‌فلزی در پوشش گالوانیزه گرم ورق فولادی، سومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گری ایران.

3. Tang, N.Y., *Discussion of Kinetics and Phase Transformation Evaluation of Fe-Zn-Al Mechanically Alloyed Phases*, Metall, Mater. Trans. A, 28 A (11) (1997) 2433-2434.

۴. قربانی، م، پوشش دادن فلزات، تهران: دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات علمی، (۱۳۷۹).

5. Thanh, N.V., *Selective dissolution from Zn-Al alloy coatings on steel*, Material chemistry.