



## Properties of SAE660 Bronze Bearing at Four Different Casting Conditions

Sina Karimifer<sup>1</sup>, Hamed Kalvand<sup>2</sup>, Seyed Ebrahim Vahdat<sup>3\*</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

2. M.Sc. in Metallurgy and Materials Engineering, Payvaran Parsian Company, Saveh, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

Received 11 August 2018  
Accepted 29 September 2018

### Abstract:

The goal of this research is to investigate the effect of two of casting parameters; i.e.; cooling rate and pouring temperature on the hardness and wear resistance via pin on disc of bearing bronze SAE660. The melting carried out in an induction furnace followed by pouring in sand mold in four different pouring temperatures of 950 and 1200°C, and cooled with water and air and finally, the microstructure via scanning electron microscopy, Vickers hardness and wear resistance via pin on disc of the SAE660 bronze had been compared. The results indicated that the effect of pouring temperature can be ignored for wear resistance and the minimum weight loss due to wear via pin on disc (or maximum wear resistance) obtained when the samples cooled with air compared to water cooling. This can be explained with the lead content, intermetallic compounds and the phase of solid solution is more in the samples cooled with air compared to water cooled. In addition, maximum hardness obtained for low pouring temperature.

### Keywords:

Microstructure,  
Bearing,  
Pouring,  
Foundry,  
Casting.

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)

### Please cite this article using:

Karimifer S., Kalvand H., Vahdat S.E., Properties of SAE660 bronze bearing at four different casting conditions, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 2(2) 89-100.

DOI: 10.22034/FRJ.2018.144061.1047

### \* Corresponding Author:

Seyed Ebrahim Vahdat, Assistant Professor

Address: Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, P.O. Box 678, Amol, Iran.

Tel: +98 911 121 4008.

E-mail: [e.vahdat@iauamol.ac.ir](mailto:e.vahdat@iauamol.ac.ir)

فصل‌نامه علمی پژوهشی



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### خواص برنز یاتاقان SAE660 در چهار شرایط ریختگی متفاوت

سینا کریمی فر<sup>۱</sup>، حامد کلوند<sup>۲</sup>، سید ابراهیم وحدت<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، واحد آیت الله املی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران. sina1414141@gmail.com  
 ۲- کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، شرکت پایوران پارسیان، شهرک صنعتی پرند، ساوه، ایران. hamed.kalvand@yahoo.com  
 ۳- استادیار، دانشکده مهندسی، واحد آیت الله املی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران. e.vahdat@iaumol.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

#### چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۰

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷

در این پژوهش، اثر دو متغیر دمای بارریزی و سرعت خنک‌کاری در فرآیند ریخته‌گری در ماسه بر سختی و مقاومت به سایش برنز یاتاقان SAE660 مطالعه شده است. مذاب برنز SAE660 در کوره القایی تهیه شده و سپس ریخته‌گری آن در قالب ماسه‌ای در چهار شرایط متفاوت شامل دماهای ذوب‌ریزی ۹۵۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌کاری قالب با آب و هوا انجام شده است. ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی، سختی به روش ویکرز و مقاومت به سایش به روش پین روی دیسک ارزیابی شده است. نتایج حاکی از این است که اثر دمای ذوب‌ریزی روی مقاومت به سایش، قابل صرف‌نظر کردن است اما کمترین کاهش جرم (یا بیشترین مقاومت به سایش) برای نمونه‌هایی است که قالب آنها در هوا خنک شده است زیرا در این نمونه‌ها، مقدار فازهای سرب، محلول جامد و ترکیب بین‌فلزی بیشتر است. به‌علاوه، نمونه‌هایی که دمای بارریزی آنها کمتر بوده است، سختی بالاتری داشتند.

#### واژه‌های کلیدی:

ریزساختار،  
 یاتاقان،  
 ذوب‌ریزی،  
 ریخته‌گری،  
 بارریزی.

#### ۱- مقدمه

می‌شود که شرایط عملکرد یاتاقان مشکل باشد [۳،۲].  
 ترکیب شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش، برنز CuSn7Pb7Zn3 در محدوده قابل قبول برنز SAE660 و C93200 است که برای ساخت یاتاقان برنزی کاربرد فراوان دارد [۴].

عوامل مؤثر روی خواص محصولات فرآیند ریخته‌گری (مانند مقدار عناصر، جنس قالب، دمای بارریزی، سرعت بارریزی و غیره) بسیار متنوع هستند که روی ریزساختار و نهایتاً خواص قطعه ریخته‌گری شده تأثیر می‌گذارند [۵]. در این تحقیق، دو متغیر مهم شامل دمای بارریزی و سرعت خنک‌کاری در برنز CuSn7Pb7Zn3 مطالعه می‌شود.

فرآیندهای ریخته‌گری زیادی وجود دارد که در هر یک از آنها، طریقه اجرا، نوع عملیات ذوب، جنس قالب و چگونگی

در فرآیند ریخته‌گری، فلزات و آلیاژها از طریق ذوب و ریختن به داخل قالب به قطعاتی با شکل، اندازه و جنس دلخواه تبدیل می‌شوند [۱]، که در این بین، آلیاژهای مقاوم به سایش برنز، مستثنی نیستند.

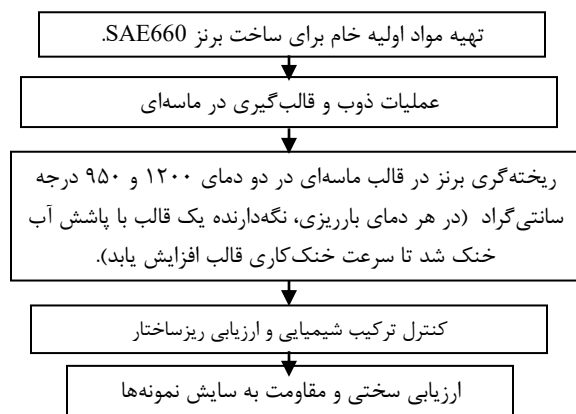
یاتاقان‌ها به عنوان قطعه‌ای فدا شونده و تحت سایش در مجموعه قطعات متحرک دستگاه استفاده می‌شوند. از طرف دیگر، یاتاقان‌ها بایستی انواع نیروهای محوری و شعاعی را در مقادیر کم و زیاد تحمل نمایند. به این ترتیب، برای فلز یاتاقان، سختی و مقاومت به سایش، دو ویژگی مهم محسوب می‌شود.

آلیاژهای یاتاقان انواع مختلفی دارند که عمده آنها پایه قلع (بابت) و یا برنزی هستند. یاتاقان برنزی زمانی استفاده

ماسه‌ای انجام شده است. در این پژوهش، بخشی از این کاستی، مرتفع می‌شود.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، برای تهیه ذوب از کوره القایی استفاده شد. برای دمای پایین ذوب‌ریزی از فرکانس (P) یعنی ۹۰ هرتز و برای دمای بالای ذوب‌ریزی از فرکانس ۱۱۰ هرتز استفاده شده است. جنس قالب، ماسه‌ای با نگه‌دارنده فولادی و شکل آن، استوانه به ارتفاع ۲۰۰ و قطر ۱۱۰ میلی‌متر، برای ۶۵ کیلوگرم شارژ، بوده است. بارریزی در دو دما، یکی با دمای ذوب‌ریزی بالا، یعنی ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، و دیگری در دمای ذوب‌ریزی پایین، یعنی ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، انجام شده است. به علاوه، برای هر دما، قالب، یک‌بار در هوا و بار دیگر، با آب خنک شده تا قالب با سرعت بیشتری سرد شود. مراحل انجام پژوهش در شکل (۱) آورده شده است. همچنین ترکیب شیمیایی مذاب، نحوه خنک شدن قالب و دمای بارریزی مطابق جدول (۱) است.



شکل ۱- مراحل تهیه نمونه و انجام آزمایش‌ها

آزمون سایش با پین به قطر ۳ میلی‌متر از جنس فولاد ابزار AISI52100 و با سرعت ۰/۲۶ متر بر ثانیه (یا سرعت دوران ۵۰۰ دور در دقیقه) و نیروی ۱۰ نیوتن و در مسافت ۴۴۰ متر در دانشگاه تربیت مدرس صورت گرفت. به علاوه، اندازه‌گیری سختی برینل با ساچمه به قطر ۲/۵ میلی‌متر در نیروی ۶۲/۵ کیلوگرم نیرو در مدت ۱۰ تا ۱۵ ثانیه و مطالعه ریزساختار با میکروسکپ الکترونی روبشی TESCAN

قالب‌گیری متفاوت است. مثلاً در ریخته‌گری ریزه یا ثقلی در قالب فلزی از قالب‌های دائمی و نیمه‌دائمی استفاده می‌شود که به دلیل سرعت انجماد بالاتر و سطح صاف فلزی به ترتیب خواص مکانیکی بالاتر و دقت ابعادی بالاتری دارد. یک روش تولید برای یاتاقان برنزی [۶-۸] و یاتاقان بابتی [۶-۸] روکش‌کاری یا لحیم‌کاری است. در این روش، فلز یاتاقان مذاب داخل پیش قالب فولادی ریخته‌گری می‌شود. به عبارت دیگر، ریخته‌گری ثقلی در قالب فلزی است.

در یاتاقان‌های برنزی که استحکام اتصال بین فولاد و برنز کافی نباشد، برای افزایش استحکام اتصال بین برنز و فولاد، محل اتصال جوشکاری می‌شود [۹]. روش دیگر، استفاده از فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز است. در این روش، فلز یاتاقان مذاب داخل قالب گریز از مرکز فولادی ریخته‌گری می‌شود [۱۰، ۱۱].

یاتاقان موجب روانی در حرکت نسبی چرخشی یا خطی بین دو قطعه می‌شود [۹]. از طرف دیگر، یاتاقان موجب کاهش اصطکاک سطوح درگیر می‌شود. دو وظیفه مهم یاتاقان در مجموعه قطعات متحرک عبارت‌اند از [۱۲]:

۱- ممانعت از لقی بیش از حد محور از طریق جلوگیری از حرکت شعاعی محور.

۲- ممانعت از برخورد قسمت‌های متحرک از طریق جلوگیری از حرکت جانبی محور.

به این ترتیب، یاتاقان به عنوان قطعه‌ای فدا شونده در مجموعه قطعات متحرک دستگاه، نقش ایفا می‌کند [۱۳]. از طرف دیگر، انواع نیروهای محوری و شعاعی توسط یاتاقان تحمل می‌شود [۱۴]. بنابراین، برای عملکرد خوب یک یاتاقان، دو ویژگی مهم شامل سختی و مقاومت به سایش مطرح است [۱۵]. به همین دلیل، در این پژوهش، ویژگی‌های سختی و مقاومت سایشی برنز CuSn7Pb7Zn3 (SAE660) مطالعه می‌شود.

هدف این پژوهش ارزیابی سختی و مقاومت به سایش فلز یاتاقان تولید شده به روش ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای است. تاکنون پژوهش‌های محدودی بر روی تأثیر سرعت خنک‌کاری قالب و دمای ذوب‌ریزی (یا دمای بارریزی یا دمای ریخته‌گری) بر روی مقاومت سایشی و سختی فلز یاتاقان برنز SAE660 در شرایط تولید ریخته‌گری در قالب

(که قالب آنها در هوا سرد شده است) دارند. این یافته در جدول (۲) نیز صحنه‌گذاری می‌شود. به طوری که اندازه فازها در نمونه‌های ۱ و ۲، کوچک‌تر از نمونه‌های ۳ و ۴ است. به‌طور مثال، حداکثر اندازه فاز محلول جامد در نمونه‌های ۱ و ۲، ۸۰ میکرومتر ولی در نمونه‌های ۳ و ۴، ۱۲۰ میکرومتر است. به هر حال، انتظار می‌رفت که با افزایش سرعت خنک کاری قالب، اندازه فازها کوچک‌تر شود.

مطابق جدول (۲) و شکل (۳)، اندازه دانه‌ها در نمونه‌های ۱ و ۲، ۲۰۰ میکرومتر و در نمونه‌های ۳ و ۴، ۱۸۰ میکرومتر است که نسبتاً درشت هستند. زیرا ۶۵ کیلوگرم مذاب در قالب استوانه‌ای شکل ماسه‌ای ریخته شده است یعنی سرعت خنک کاری آهسته بوده است [۱]. در نمونه‌های ۳ و ۴، نگه‌دارنده قالب با آب خنک می‌شد، تأثیر چندانی در ریزدانه‌نگی نداشت زیرا ضخامت قالب ماسه‌ای سبب شد تا به عنوان عایق عمل کند [۱] و مانع انتقال حرارت از قالب شود.

مطابق نتایج کمی و کیفی طیف تفکیک انرژی در تصاویر الف تا د شکل (۴) که به ترتیب ترکیب شیمیایی زمینه نمونه‌های ۱ تا ۴ را به نمایش می‌گذارد، مشاهده می‌شود که در نمونه‌هایی که قالب آن با آب سرد شده است (یعنی نمونه‌های ۱ و ۲) مجموع عناصر آلیاژی حل شده در زمینه (عمدتاً قلع) کمتر از ۶ درصد وزنی است. در حالی که در نمونه‌هایی که قالب آن در هوا خنک شده است (یعنی نمونه‌های ۳ و ۴)، مجموع عناصر آلیاژی حل شده در زمینه (عمدتاً قلع) بیش از ۱۰ درصد وزنی است. به این ترتیب، مطابق انتظار، سرعت خنک‌کاری بیشتر، تشکیل فاز را تسهیل می‌کند و لذا فازهای ریزتری تشکیل می‌شود.

VEGA در مرکز پژوهش متالورژی رازی انجام شد. درصد حجمی فازها از طریق محاسبه نسبت سطح اشغال شده توسط هر فاز به کل سطح زمینه با کمک سه تصویر میکروسکپ الکترونی در مقیاس ۲۰۰ میکرومتر (در بزرگ‌نمایی ۱۵۰ برابر) به دست آمد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و دمای بارریزی فلز یا تاقان برنزی

نمونه	دمای بارریزی درجه سانتی‌گراد	محیط خنک کاری قالب	٪ Cu	٪ Zn	٪ Pb	٪ Sn	٪ Mg	٪ Al	٪ Fe	٪ Si	٪ Mn	٪ Ni	٪ S	٪ P
۱	۱۲۰۰	آب	درصد وزنی	بقیه	۲/۷	۶/۵	۱۳/۶	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/۲۳
	۹۵۰													
۲	۱۲۰۰	هوا	درصد وزنی	بقیه	۲/۷	۶/۵	۱۳/۶	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/۲۳
	۹۵۰													

### ۳- نتایج و بحث

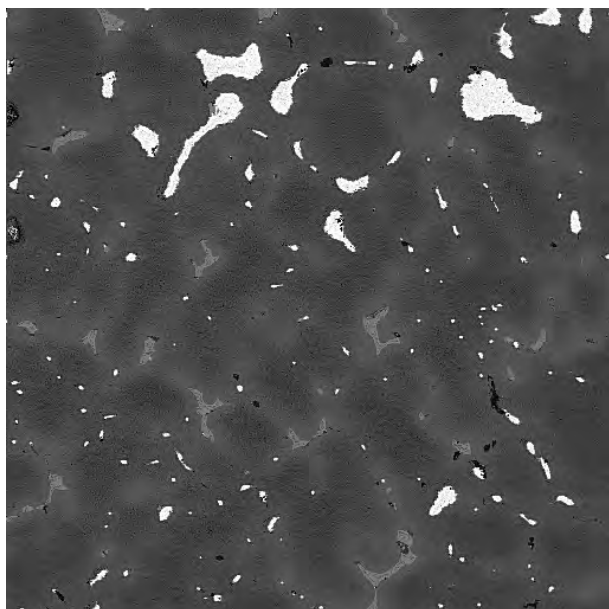
شرایط مختلف تولید شامل، دمای بارریزی و محیط خنک‌کاری قالب، به همراه نتایج آزمون‌ها شامل کاهش جرم، سختی، اندازه دانه، مقدار و محدوده اندازه فازها برای هر چهار نمونه در جدول (۲) آورده شده است.

#### ۳-۱- ارزیابی ریزساختار

ریزساختار نمونه ۱ الی ۴ به ترتیب در تصاویر الف تا د شکل (۲) نشان داده شده است. با کمک سه تصویر میکروسکپ الکترونی مشابه در هر یک از تصاویر شکل‌های (۲)، میانگین مقدار فازها و محدوده اندازه فازها تعیین و در جدول (۲) فهرست شده است. از طریق مقایسه شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) با شکل‌های (۲-ج) و (۲-د)، به طور کیفی مشاهده می‌شود که نمونه‌های ۱ و ۲ (که قالب آنها با آب خنک شده است) فازها به نسبت پراکنده‌تر و ریزتر از نمونه‌های ۳ و ۴

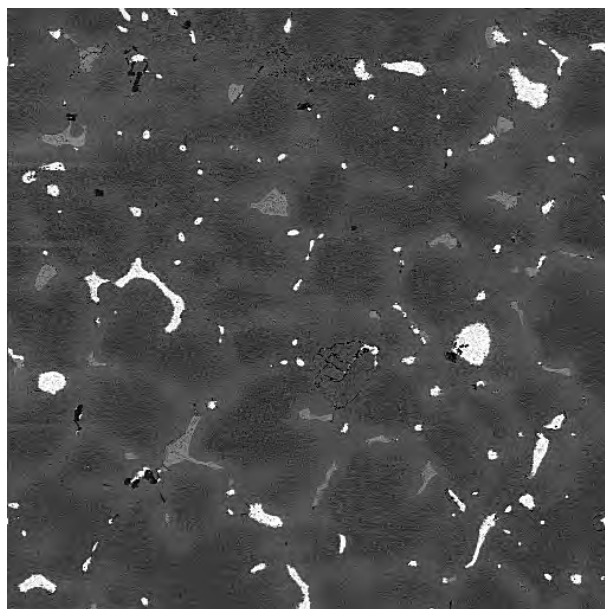
جدول ۲- شرایط تولید، مقدار و محدوده اندازه فازها، سختی و کاهش جرم در اثر سایش برنز SAE660

نمونه	محیط خنک کاری قالب	دمای بارریزی درجه سانتی‌گراد	کاهش جرم میلی‌گرم	سختی برینل	اندازه دانه میکرومتر	مقدار فاز بر حسب درصد حجمی +۱۰٪		محدوده اندازه فاز بر حسب میکرومتر	
						محلول جامد	سرب	محلول جامد	سرب
۱	آب	۱۲۰۰	۶/۱	۶۳+۳٪	۱۸۰+۱۰٪	۱	۳	۶۰ تا ۱۰۰	۲۰ تا ۱۰۰
۲		۹۵۰	۶/۵	۷۵+۳٪	۱۸۰+۱۰٪	۰/۹	۳	۸۰ تا ۱۴۰	۲۰ تا (استثنا ۶۰)
۳	هوا	۱۲۰۰	۳/۹	۶۸+۳٪	۲۰۰+۱۰٪	۱/۸	۴	۱۰۰ تا ۱۰۰	۲۰ تا ۱۰۰
۴		۹۵۰	۳/۶	۷۲+۳٪	۲۰۰+۱۰٪	۱/۸	۵	۱۲۰ تا ۱۶۰	۲۰ تا ۱۶۰



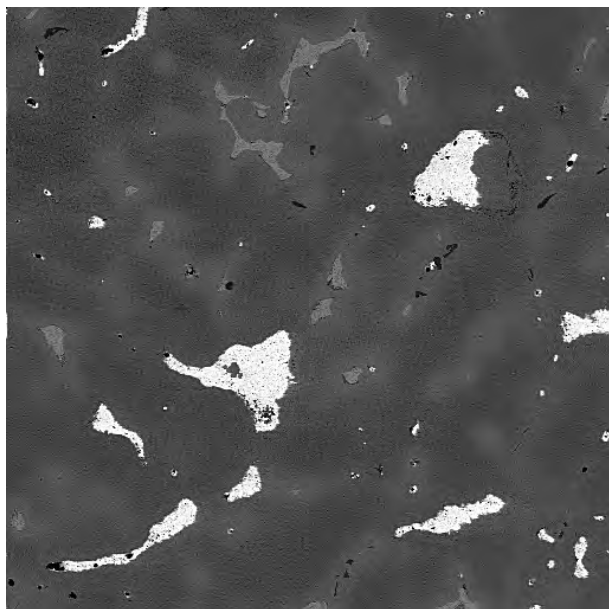
SEM MAG: 150 x WD: 18.52 mm VEGA\\ TESCAN  
SEM HV: 15.00 kV Det: BSE Detector 200 μm  
Date(m/d/y): 10/08/16 Vac: HiVac RAZI

ب: ذوب ریزی در ۹۵۰ درجه سانتی گراد و خنک کاری در آب



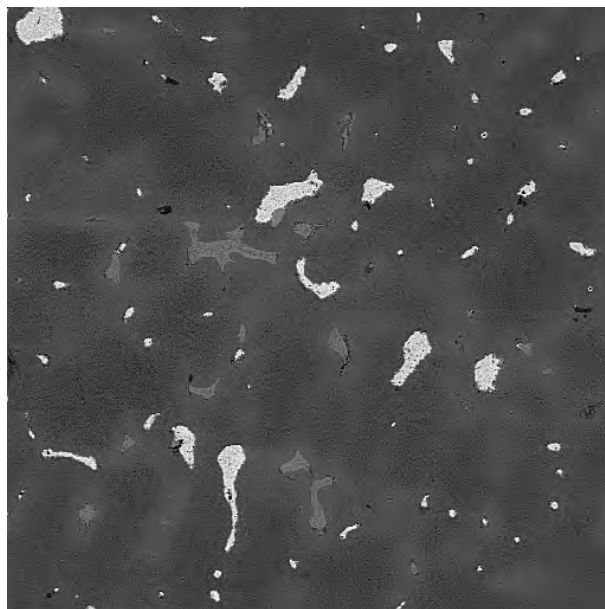
SEM MAG: 150 x WD: 13.91 mm VEGA\\ TESCAN  
SEM HV: 15.00 kV Det: BSE Detector 200 μm  
Date(m/d/y): 10/08/16 Vac: HiVac RAZI

الف: ذوب ریزی در ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و خنک کاری در آب



SEM MAG: 150 x WD: 15.54 mm VEGA\\ TESCAN  
SEM HV: 15.00 kV Det: BSE Detector 200 μm  
Date(m/d/y): 10/08/16 Vac: HiVac RAZI

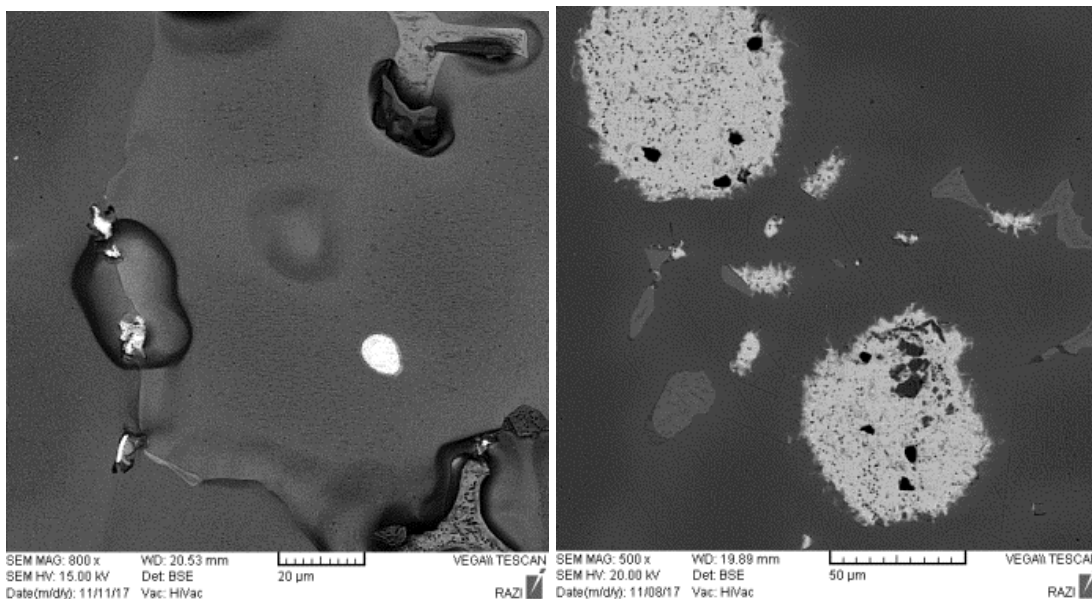
د: ذوب ریزی در ۹۵۰ درجه سانتی گراد و خنک کاری در هوا



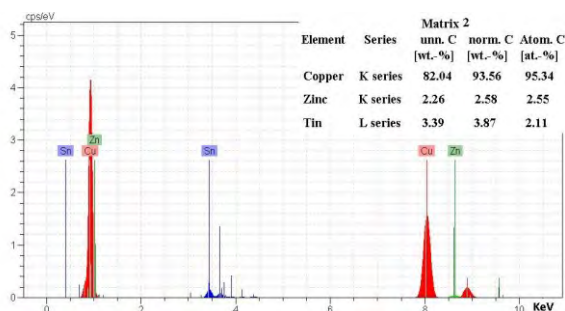
SEM MAG: 150 x WD: 14.75 mm VEGA\\ TESCAN  
SEM HV: 15.00 kV Det: BSE Detector 200 μm  
Date(m/d/y): 10/08/16 Vac: HiVac RAZI

ج: ذوب ریزی در ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و خنک کاری در هوا

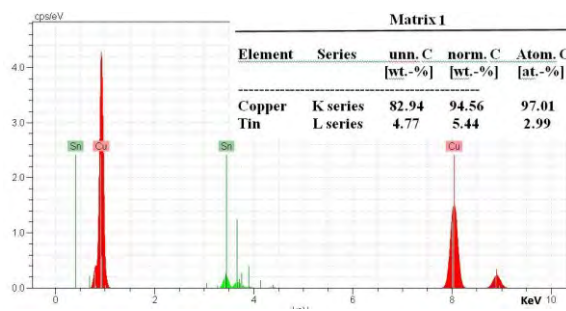
شکل ۲- ریزساختار برنز SAE660 ریخته‌گری شده در دماها و سرعت خنک کاری متفاوت: الف- نمونه ۱، ب: نمونه ۲، ج: نمونه ۳، د: نمونه ۴



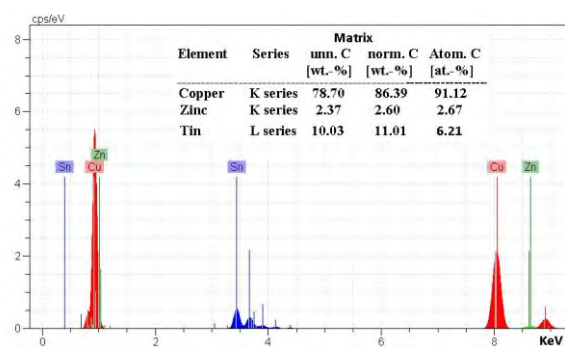
شکل ۳- مرز دانه‌ها حاوی مقادیر زیادی از سرب (فاز سفید) و ناخالصی‌ها (فاز سیاه) در: الف) نمونه ۱ و ب) نمونه ۲.



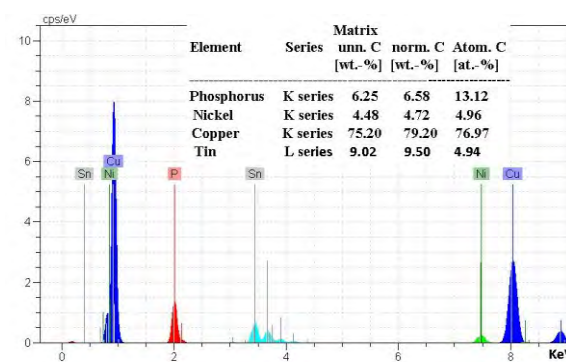
ب- نمونه ۲



الف- نمونه ۱



د- نمونه ۴



ج- نمونه ۳

شکل ۴- طیف تفکیک انرژی زمینه در نمونه‌های مختلف

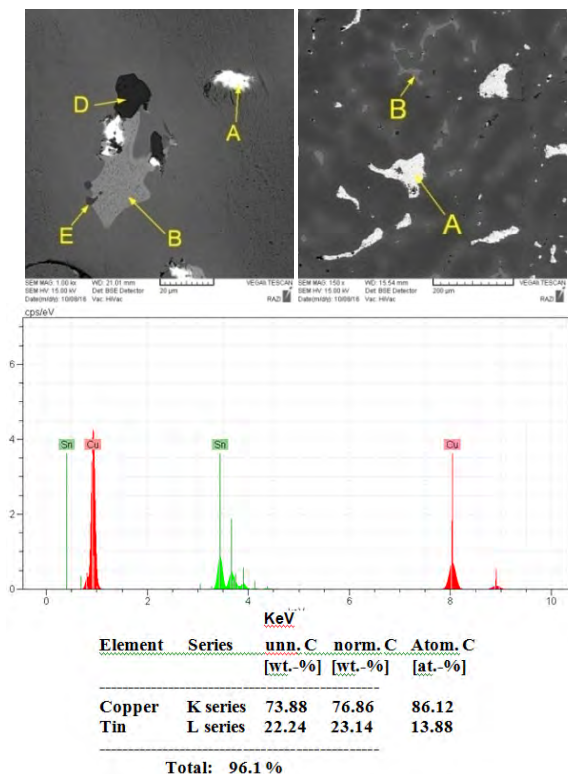
### ۲-۳- ارزیابی فازها

برای پرهیز از خطا در ارزیابی فازها، آنالیز فازی برای فازهای مشابه در هر نمونه، ۳ مرتبه انجام شد. به طور مثال، برای فاز محلول جامد خاکستری رنگ در هر یک از نمونه‌های ۱ تا ۴، سه مرتبه آنالیز فازی انجام شد اما فقط یکی از آنها نمایش داده شد و مقدار کمی عناصر ذکر شده در متن مقاله محدوده اندازه‌گیری شده در ۱۲ مرتبه آنالیز فازی در نمونه‌های ۱ تا ۴ است. بر این اساس، مطابق نتایج کمی و کیفی طیف تفکیک انرژی (EDS) در شکل‌های (۵) تا (۹)، در هر چهار شرایط تولید، مطابق شکل (۵)، فاز خاکستری رنگ، محلول جامد ۸۴ تا ۹۲ درصد اتمی مس و مابقی (یعنی ۱۶ تا ۸ درصد اتمی) بیشتر قلع و کمتر روی است.

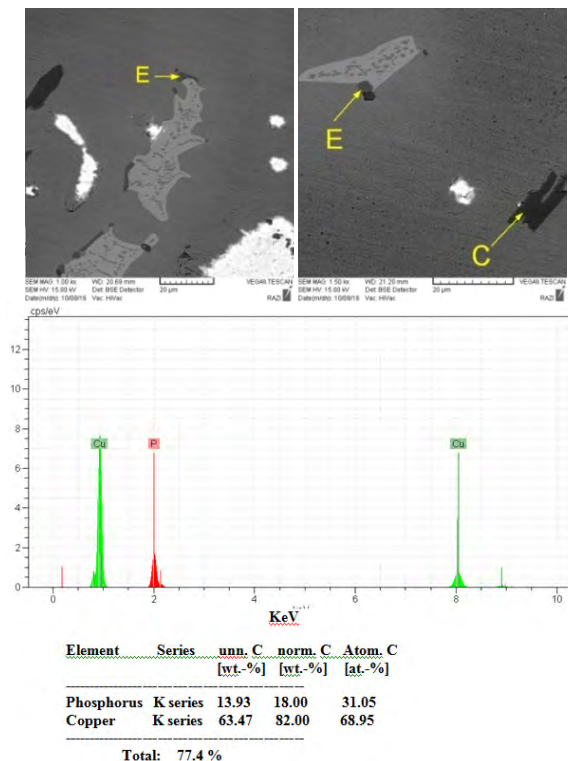
مطابق شکل (۶)، فاز سیاه رنگی که در کنار فاز خاکستری (محلول جامد مس و قلع) وجود دارد، ترکیب بین‌فلزی مس و فسفر است. به علاوه، فازهای مشکی رنگ که عمدتاً به صورت منفرد یا در کنار سرب، گوشه‌های تیز دارند، مطابق شکل (۷) و شکل (۸) به ترتیب ناخالصی‌هایی از قبیل، ترکیب بین فلزی آهن-نیکل-فسفر و سولفید روی هستند.

مطابق شکل (۹)، فاز سفید رنگ، سرب خالص است. به علاوه، مطابق شکل (۳)، در برخی از فازهای سرب (فاز سفید)، ناخالصی (فاز سیاه) مشاهده می‌شود زیرا سرب آخرین فازی است که منجمد می‌شود و لذا فازهای ناخالصی در آن غوطه‌ور می‌شوند و در نهایت، در مرزدانه‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۳).

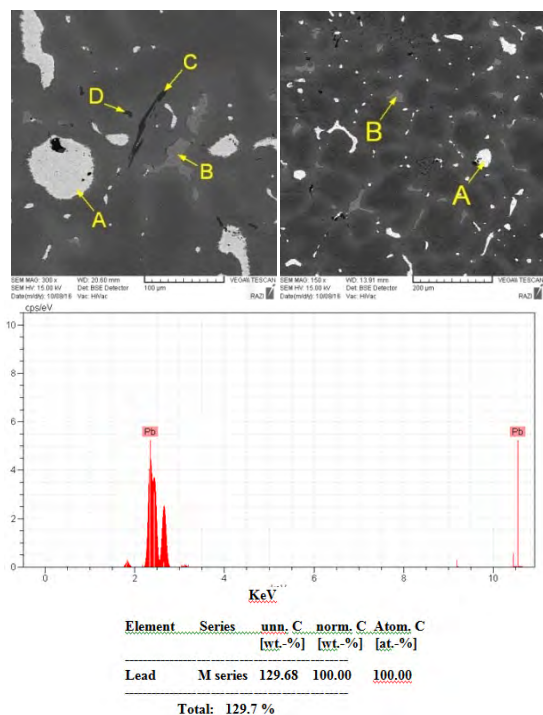
برای صحت‌گذاری موارد اشاره شده در شکل‌های (۵) تا (۹)، نقشه جانمایی عناصر سرب، روی، مس و قلع در نمونه‌های ۱ تا ۴ در شکل (۱۰)، به نمایش گذاشته شده است. مشاهده می‌شود که فازهای سفید سرب تقریباً خالص بوده و فازهای سیاه داخل آن، غنی از روی (و سایر عناصر باقیمانده مطابق با جدول (۱) مانند آهن، گوگرد و فسفر) هستند و به علاوه، مقداری از فلز روی نیز در سرب حل شده است. نوع فازها مشاهده شده تطابق خوبی با نوع فازها در سایر پژوهش‌ها دارد [۶-۱۲، ۲۰]. به عبارت دیگر، این نوع فازها در سایر آلیاژهای برنز با ترکیب تقریباً مشابه نیز مشاهده شده است.



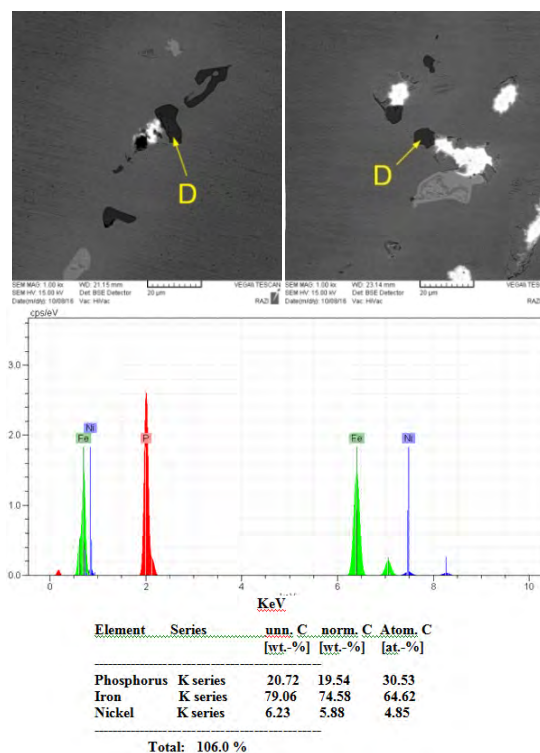
شکل ۵- تصاویر SEM و طیف تفکیک انرژی فاز محلول جامد مس-قلع (فاز B)



شکل ۶- تصاویر SEM و طیف تفکیک انرژی ترکیب بین فلزی فسفر و مس (فاز E)



شکل ۹- تصاویر SEM و طیف تفکیک انرژی فاز سرب خالص (فاز A)

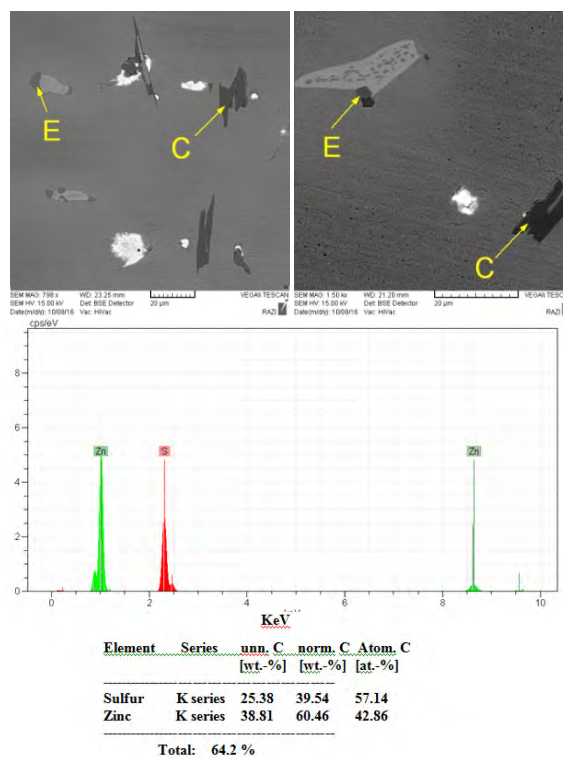


شکل ۷- تصاویر SEM و طیف تفکیک انرژی ترکیب بین فلزی آهن-نیکل-فسفر (فاز D)

### ۳-۳- ارزیابی سختی و مقاومت به سایش

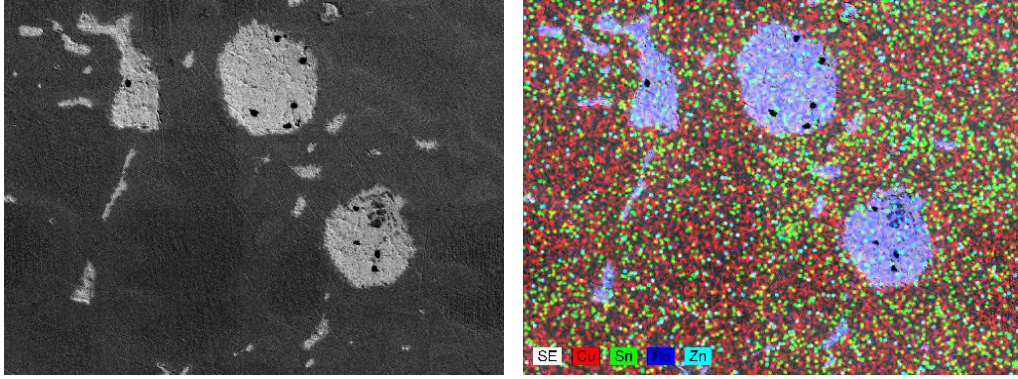
مطابق شکل (۱۱) یا جدول (۲)، نمونه‌های ۳ و ۴ (نمونه‌هایی که قالب آن در هوا خنک شده است) نسبت به نمونه‌های ۱ و ۲ (نمونه‌هایی که قالب آن با آب خنک شده است) به ترتیب برابر با ۳۶ و ۴۵ درصد کاهش جرم کمتری داشته‌اند. زیرا، مطابق شکل (۴)، زمینه نمونه‌های ۳ و ۴ نسبت به زمینه نمونه‌های ۱ و ۲، غنی‌تر از عناصر آلیاژی (عمدتاً قلع و روی) به ترتیب بیشتر از ۱۰ درصد وزنی و کمتر از ۶ درصد وزنی) است که موجب افزایش استحکام در زمینه برنز و لذا افزایش مقاومت به سایش (یا افت کاهش جرم بر اثر سایش) می‌شود. به علاوه، مطابق جدول (۲)، نمونه‌های ۳ و ۴، مقدار محلول جامد بیشتر (۱/۸ درصد حجمی) و بزرگ‌تری (تا ۱۲۰ میکرومتر) دارند که باز هم موجب افزایش مقاومت به سایش (یا افت کاهش جرم بر اثر سایش) می‌شود.

مطابق جدول (۲) یا شکل (۱۱)، نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱، مقدار سرب نامحلول بزرگ‌تر (به ترتیب، تا ۱۴۰ و ۱۰۰ میکرومتر) اما با مقدار برابر (۳ درصد حجمی) دارد که به دلیل نقطه ذوب پایین، موجب روان‌کاری سهل‌تر در زمینه

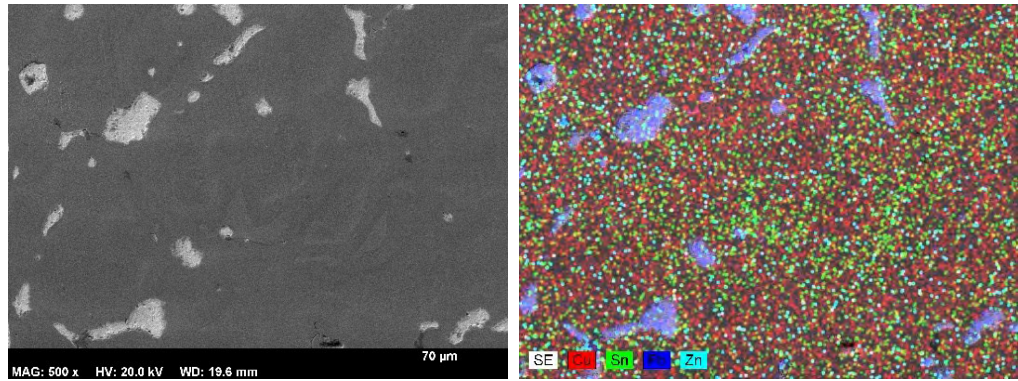


شکل ۸- تصاویر SEM و طیف تفکیک انرژی سولفید روی (فاز C)

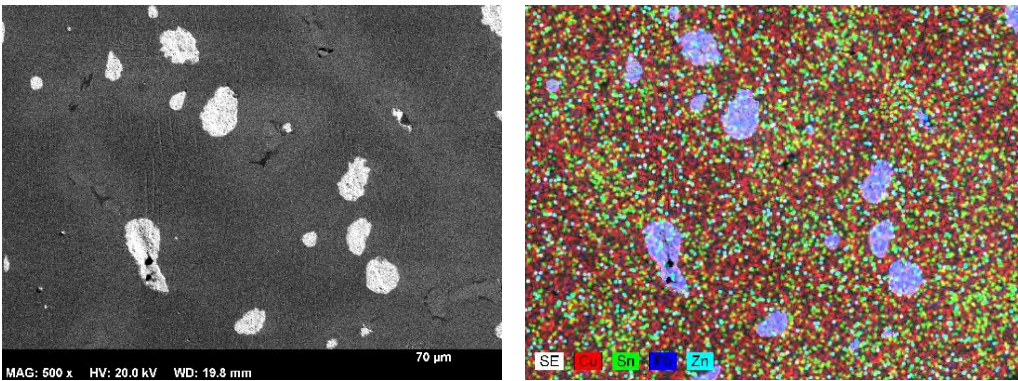




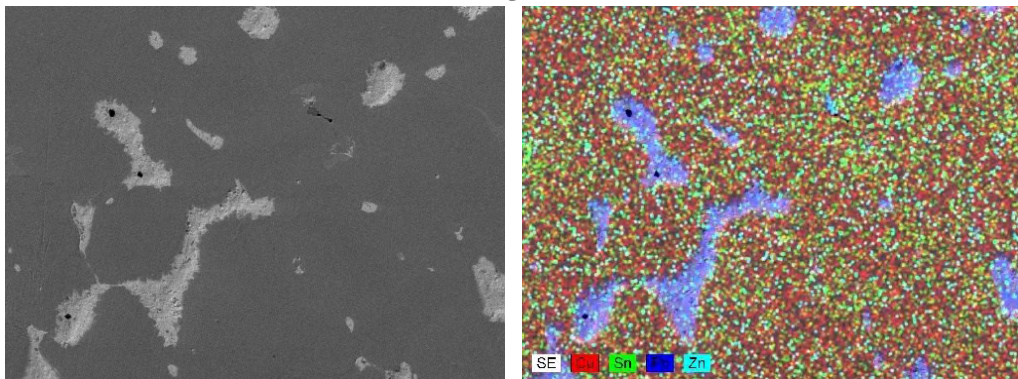
الف-نقشه جانمایی عناصر نمونه ۱



ب-نقشه جانمایی عناصر نمونه ۲



پ-نقشه جانمایی عناصر نمونه ۳



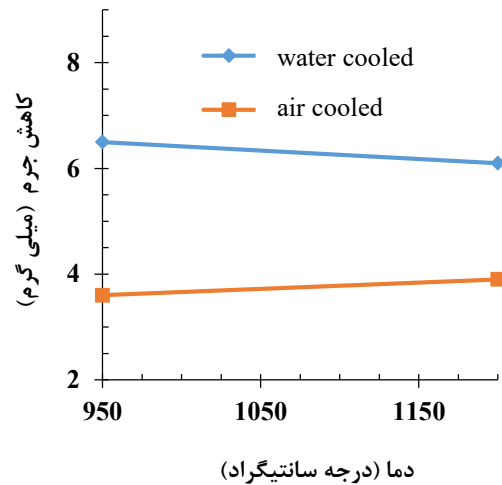
ت-نقشه جانمایی عناصر نمونه ۴

شکل ۱۰- نقشه جانمایی عناصر در نمونه‌های ۱ تا ۴ به منظور صحت‌گذاری شکل‌های ۱۱ تا ۱۵

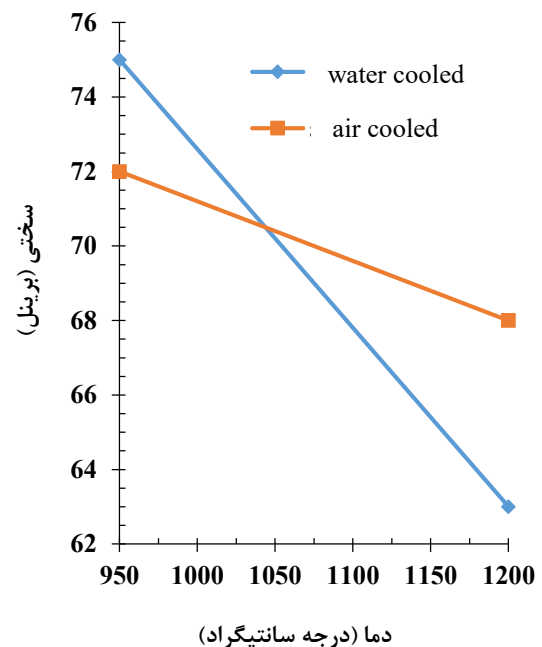
برنز (و یا افزایش مقاومت به سایش) می‌شود. از طرف دیگر، آن، موجب افزایش کاهش جرم به دلیل حذف سرب از زمینه (یا کاهش مقاومت به سایش) می‌شود. تقابل بین این دو عامل، نهایتاً موجب شده است که کاهش جرم نمونه ۱ کمتر از کاهش جرم نمونه ۲ به ترتیب برابر با ۶/۱ و ۶/۵ میلی‌گرم باشد. بعلاوه، نمونه ۴ (دمای بارریزی ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد) نسبت به نمونه ۳ (دمای بارریزی ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد)، مقدار سرب نامحلول بیشتر (به ترتیب، ۵ و ۴ درصد حجمی) و بزرگ‌تر (به ترتیب، تا ۱۶۰ میکرومتر و تا ۱۰۰ میکرومتر) دارد که به طور مشابه، به دلیل نقطه ذوب پایین، موجب روان‌کاری سهل‌تر در زمینه برنز (و یا افزایش مقاومت به سایش) می‌شود. از طرف دیگر، آن، موجب افزایش کاهش جرم به دلیل حذف سرب از زمینه (یا کاهش مقاومت به سایش) می‌شود. تقابل بین این دو عامل، نهایتاً موجب شده است که کاهش جرم نمونه ۴ کمتر از کاهش جرم نمونه ۳ به ترتیب برابر با ۳/۶ و ۳/۹ میلی‌گرم باشد. اگر چه تحلیل فوق برای ارتباط بین کاهش جرم بر اثر سایش و دمای بارریزی وجود دارد، اما چون اختلاف کاهش جرم خیلی زیاد نیست (کمتر از ۱۰ درصد است) لذا برای آلیاژ فوق در محدوده دمای بارریزی ۹۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، در کاربردهای مهندسی می‌توان از اثر دمای بارریزی روی کاهش جرم بر اثر سایش صرف‌نظر کرد.

در پژوهش ظاهری و وحدت [۷] مقاومت سایشی برنز یاتاقان SAE660 تولیدشده به روش ریخته‌گری در پیش قالب فولادی با کمک روش پین روی دیسک در مسافت ۲۲ متر تحت تنش ۷/۹ مگاپاسکال بدون روان‌کار برابر با ۱۰۰ درصد کاهش جرم بوده است که خیلی کمتر از پژوهش حاضر است. زیرا در پژوهش حاضر، نیروی اعمال شده برای سایش حدود ۰/۱۴ مگاپاسکال (در مقابل، ۷/۹ مگاپاسکال) است. نیروی اعمال شده زیاد برای سایش، مقاومت سایشی را کاهش می‌دهد.

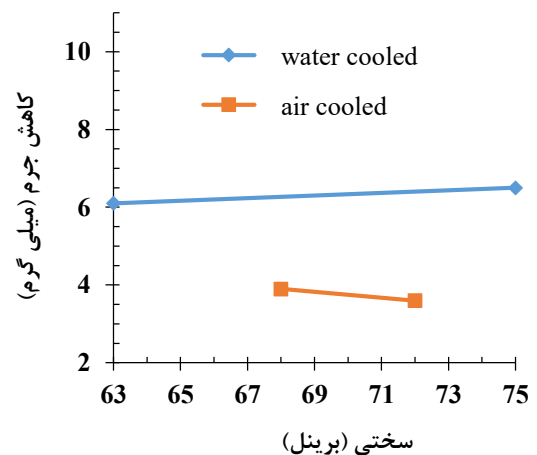
افزایش مقدار فازهای سخت مانند فاز محلول جامد و ترکیب بین‌فلزی موجب افزایش سختی می‌شود [۱۵]. از طرفی، افزایش مقدار فاز سرب (نرم) موجب کاهش سختی می‌شود. به علاوه، زمینه غنی از عناصر آلیاژی که نسبتاً مستحکم است می‌تواند موجب افزایش سختی شود. تقابل بین این عوامل سبب می‌شود که مطابق شکل (۱۲) یا جدول (۲)، نمونه‌های ۲ و ۴ (نمونه‌هایی که در دمای ۹۵۰



شکل ۱۱- ارتباط بین دمای بارریزی و کاهش جرم بر اثر سایش



شکل ۱۲- ارتباط بین سختی با دمای بارریزی و شرایط خنک‌کاری



شکل ۱۳- ارتباط بین سختی و کاهش جرم بر اثر سایش در شرایط مختلف خنک‌کاری

۱- در محدوده دمایی فوق برای آلیاژ مورد پژوهش، اثر دمای بارریزی روی مقاومت به سایش، قابل صرف نظر کردن است اما در هر یک از دماهای بارریزی نامبرده، نمونه‌هایی که قالب آنها در هوا خنک شده است، نسبت به نمونه‌هایی که قالب آنها با آب خنک شده است به‌طور میانگین مقاومت سایشی آنها ۴۰ درصد افزایش پیدا کرده است زیرا مقدار فاز محلول جامد تقریباً دو برابر و مقدار فاز سرب تقریباً یک و نیم برابر شده و مقدار ترکیب بین فلزی نیز افزایش داشته است.

۲- برای دستیابی به سختی بیشتر بایستی بارریزی در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شود.

۳- برای دستیابی به سختی بالا (۷۲ برینل) و حداقل کاهش جرم بر اثر سایش (۳/۶ میلی‌گرم) برای برنز یاتاقان مورد پژوهش، بارریزی در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌کاری قالب در هوا، توصیه می‌شود.

#### مراجع

- [1] ASM Handbook: Casting. Volume 15, Committee AIH, Lampman S, Moosbrugger C, DeGuire E, Metals ASf., ASM International, 2008.
- [2] NEALE, M.J. Bearings - High speed bearings and rotor dynamics A2, Butterworth-Heinemann, 1993, 45-49.
- [3] Rowe WB. Chapter 6 - Basis of Design Procedures. Hydrostatic, Aerostatic and Hybrid Bearing Design. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2012. 115-124.
- [4] NEALE, M.J. Bearings- Plain bearing materials A2, Butterworth-Heinemann, 1993, 9-14.
- [5] Campbell J. Chapter 5 - Solidification Structure. Complete Casting Handbook (Second Edition). Boston, Butterworth-Heinemann, 2015, 163-222.
- [6] Zaheri M, Vahdat SE. Strength of the Bond of Structural Steel S235JR to Bronze SAE660 Produced by Casting in Pre-Mold, Archives of Foundry Engineering, 2017, 149-153.
- [7] ظاهری م.، وحدت س.ا.، استحکام اتصال فولاد ساختمانی عمومی به برنز SAE660 تولید شده به روش ریخته‌گری در پیش قالب، اولین کنگره ملی کاربرد مواد و ساخت پیشرفته در صنایع، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۳ تا ۵ خرداد ۱۳۹۶.
- [8] زند ا.، کلوند ح.، وحدت س.ا.، مطالعه ریزساختار برای تعیین طول اتصال بین فولاد CK10 و بابت‌گرید ASTM B2 روکش‌کاری شده به روش لحیم‌کاری نرم، ۱۱۱، ریخته‌گری، ۳۲-۳۷.
- [9] زند ا.، کلوند ح.، وحدت س.ا.، تعیین طول اتصال بین فولاد CK 25 و بابت‌گرید ASTM B 2 روکش‌کاری شده به روش لحیم‌کاری نرم با استفاده از ریزساختار، پنجمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی و دهمین کنفرانس مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن ریخته‌گری ایران، دانشگاه شیراز، ۱۸ و ۱۹ آبان ۱۳۹۵.

درجه سانتی‌گراد بارریزی شده‌اند) نسبت به نمونه‌های ۱ و ۳ (نمونه‌هایی که در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بارریزی شده‌اند) به ترتیب ۱۹ و ۶ درصد سختی بیشتری دارند. بنابراین، برای دستیابی به سختی بیشتر بایستی این آلیاژ در دمای بارریزی کمتر یعنی ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد ریخته‌گری شود.

پیش‌بینی می‌شود که سختی با کاهش جرم (یا عکس مقاومت به سایش) رابطه معکوس داشته باشد [۱۵]. در شکل (۱۳)، مقدار سختی و کاهش جرم بر اثر سایش نمونه‌ها مقایسه شده است. برای نمونه‌های ۳ و ۴، سختی با کاهش جرم بر اثر سایش، رابطه معکوس دارد اما بر خلاف قاعده فوق، برای نمونه‌های ۱ و ۲، سختی با کاهش جرم رابطه مستقیم پیدا می‌کند. زیرا، سرب نامحلول و نرم، به دلیل نقطه ذوب پایین، موجب روان‌کاری سهل‌تر و یا به عبارتی افزایش مقاومت سایشی می‌شود. از طرف دیگر، سرب نامحلول و نرم، موجب کاهش سختی و افزایش کاهش جرم (به دلیل حذف سرب از زمینه) می‌شود. همچنین، زمینه غنی از عناصر آلیاژی موجب افزایش استحکام در زمینه برنز و لذا افزایش مقاومت به سایش می‌شود. به علاوه، افزایش فازهای نسبتاً سخت مانند فاز محلول جامد و ترکیب بین‌فلزی موجب افزایش سختی و مقاومت به سایش می‌شود. تقابل بین این عوامل موجب می‌شود در برخی از نمونه‌ها (نمونه‌های ۱ و ۲)، سختی با مقاومت به سایش رابطه مستقیم نداشته باشد.

در پژوهش ظاهری و وحدت [۶] سختی برنز یاتاقان SAE660 تولیدشده به روش ریخته‌گری در پیش قالب فولادی ۸۰ ویکرز بوده است که کمی بیشتر از پژوهش حاضر است. زیرا در پژوهش حاضر، مقدار سرب خیلی بیشتر یعنی ۱۳/۶ درصد وزنی (در مقابل، ۹/۰ درصد وزنی) است. سرب نامحلول، نرم است و لذا سختی را کاهش می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ریزساختار و سختی و کاهش جرم بر اثر سایش برنز SAE660 در چهار شرایط تولید متفاوت، مورد مقایسه قرار گرفته است. قالب دو نمونه در هوا و قالب دو نمونه دیگر با آب خنک شده است در شرایطی که یکی در میان، در دماهای ۱۲۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، در قالب ماسه‌ای، بارریزی شده‌اند. نتایج حاکی از این است که:

- [10] زند ا.، کلوند ح.، وحدت س.ا.، اتصال نفوذی برنز C52100 به صفحه فولادی CK20 به روش جوشکاری MIG جهت ساخت یاتاقان محوری دولایه، دومین همایش و نمایشگاه ملی تجهیزات و مواد آزمایشگاهی صنعت نفت ایران، دانشگاه تهران، ۲۷ و ۲۸ مهر ۱۳۹۵.
- [11] Soflaei H, Vahdat S. Microstructure Study of diffusion bonding of centrifuged structural steel-bronze, Archives of Foundry Engineering, 2016,16(2), 99-104.
- [12] ماهر ج.، زند ا.، کلوند ح.، بررسی ریزساختار اتصال بین لایه‌های برنز و فولاد در یاتاقان ژورنال تولید شده به روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، ریخته‌گری، ۱۳۹۴، ۱۱۰، ۱-۷
- [13] Neale, M.J., Bearings selection of journal bearings A2, Butterworth-Heinemann, 1993, 4-6.
- [14] Challen B, Baranescu R. Diesel Engine Reference Book: Butterworth-Heinemann, 1999, 682.
- [15] Rowe WB., Chapter 1 - Application Hydrostatic, Aerostatic and Hybrid Bearing Design, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2012, 1-23.
- [16] وحدت س.ا.، مواد مناسب برای موتور دیزل، چاپ دوم، تهران، چرتکه، ۱۳۹۱، ۱۲۴.
- [17] Rowe WB., Chapter 3 - Power, Temperature Rise, and Shape Optimization, Hydrostatic, Aerostatic and Hybrid Bearing Design, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2012, 49-64.
- [18] NEALE, M.J. Bearings, Selection of bearing type and form A2 - Butterworth-Heinemann, 1993, 1-3.
- [19] Wardle F., 4 - Aerostatic bearings, Ultra-Precision Bearings, Oxford, Woodhead Publishing, 2015, 227-306.
- [20] کلوند ح.، آقامیری، س.ا.، وحدت س.ا.، ارتباط بین سختی و ریزساختار آلیاژ بابت در ریخته‌گری گریز از مرکز افقی، ریخته‌گری، ۱۳۹۳، ۱۰۶، ۴۸-۵۹.