



مهندسی معکوس و شناسایی گلوگاه‌های تولید به منظور بومی‌سازی نازل‌های تاندیش مورد استفاده در صنعت ریخته‌گری پیوسته فولاد امین اسمعیل‌زاده آشین^۱، مهدی فیض‌پور^{۱*}، هادی برزگر بفرئوی^۱

۱- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه میبد، یزد، ایران

۲- شرکت فولاد کاوه جنوب کیش، بندرعباس، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: feizpour@meybod.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۱ مرداد ۱۴۰۴

پذیرش: ۲۷ آبان ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

مهندسی معکوس

روش‌های شناسایی مواد

نازل

زیرکونیا

جرم نسوز

تاندیش

ریخته‌گری پیوسته فولاد

این مقاله بر آن است که با بررسی اجزای یک نمونه نازل تاندیش خارجی، گلوگاه‌های تولید این قطعه را شناسایی کرده و نشان دهد چگونه می‌توان با رفع این موانع، به دانش فنی ساخت آن دست یافت و جایگزینی مطمئن برای نمونه خارجی فراهم آورد. نازل تاندیش در این پژوهش در سه بخش مورد بررسی قرار گرفته است: نگهدارنده فلزی، جرم نسوز نشیمنگاه نازل و تویی نازل. نتایج آنالیز ICP، SEM-EDS و بررسی فازی به روش پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد بیش از ۹۹/۵٪ درصد وزنی نگهدارنده فلزی از عنصر آهن تشکیل شده است. میزان کربن آن ۰/۰۵۵ درصد وزنی بوده و هیچ عنصر آلیاژی خاصی در آن وجود ندارد. فاز اصلی آن آهن آلفا (فریت) است که مقدار اندکی کاربید آهن (سمنتیت) کمتر از یک درصد وزنی در آن دیده می‌شود. همچنین، نتایج حاصل از بررسی‌های فازی XRD، آنالیز شیمیایی XRF و مشاهدات SEM-EDS از جرم نسوز و تویی نازل نشان داد: در جرم نسوز فازهای آلومینا، مولایت، سیلیس و اسپینل وجود دارد و تویی نازل نیز از زیرکونیا نیمه‌پایدار، تثبیت‌شده با ۲ تا ۳ درصد اکسید کلسیم و اکسید منیزیم تشکیل شده است. بر این اساس پیش‌بینی می‌شود در تولید جرم نسوز از آلومینا، ترکیبات رسی مانند کائولن و بال‌کلی، زیرکون (سیلیکات زیرکونیم) و کربن استفاده شده باشد و برای تویی نازل از زیرکونیا نیمه‌پایدار بهره گرفته شده باشد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که گلوگاه تولید نگهدارنده فلزی نازل تاندیش، عمدتاً در فرایند پرس‌کاری و ساخت قالب مخصوص این قطعه نهفته است. گلوگاه تولید جرم نسوز به انتخاب و فرمولاسیون دقیق مواد اولیه مربوط می‌شود تا بتوان به آنالیز فازی مطلوب رسید و عملکرد مناسبی در شرایط عملیاتی واقعی داشت. در مورد تویی زیرکونیا، نیز، چالش اصلی به دانش فنی روش‌های تولید آن بازمی‌گردد؛ چرا که شکل خاص این قطعه امکان پرس پودر به روش‌های متعارف را فراهم نمی‌کند و لازم است از روش‌هایی مانند ریخته‌گری دوغایی یا پرس ایزواستاتیک استفاده شود که هر یک پیچیدگی‌های خاص خود را دارند.

Reverse engineering and bottleneck analysis for domestic production of tundish nozzles used in steel continuous casting

Amin Esmailzadeh Ashini^{1,2}, Mahdi Feizpour^{1*}, Hadi Barzegar Bafrooei¹

1- Department of Materials Science and Engineering, School of Engineering, Meybod University, 89616-99557, Yazd, Iran

2- South Kaveh Steel Company (SKS), Bandar Abbas, Iran

* Corresponding Author's Email: feizpour@meybod.ac.ir

Article Information

Abstract

Original Research Paper

Received: 12 August 2025

Accepted: 18 November 2025

Keywords:

Reverse Engineering

Characterization Techniques

Nozzle

Zirconia

Refractory Castable

Tundish

Steel Continuous Casting

This study aims to identify the key production bottlenecks in manufacturing a high-quality tundish nozzle comparable to an imported foreign part. By overcoming these bottlenecks, we strive to develop the technical expertise necessary to produce these nozzles domestically. The tundish nozzle was examined in three parts: the metallic holder, the refractory castable (nozzle seat), and the nozzle insert. Analysis using ICP, SEM-EDS, and XRD revealed that this holder is composed of over 99.5% iron, with a carbon content of 0.055% and no significant alloying elements. The primary phase is alpha iron (ferrite), with a small amount (less than 1%) of iron carbide (cementite). Analysis of the refractory castable and nozzle insert using XRD, XRF, and SEM-EDS indicated that these components contain alumina, mullite, silica, and spinel phases (in the refractory castable) and partially stabilized zirconia using 2-3% calcium oxide and magnesium oxide (in the nozzle insert). We believe that the refractory part consists of alumina, clay compounds (including kaolin and ball clay), zircon (zirconium silicate), and carbon, while the insert utilizes partially stabilized zirconia. The research indicates that the key bottleneck in producing the metal holder is the shaping process, which uses a dedicated mold. For the refractory part, the bottleneck lies in achieving a suitable formulation of raw materials to obtain the desired phase composition for optimal performance under operating conditions. The production of the zirconia nozzle insert is challenging due to its complex and hollow shape, which requires specialized techniques such as slip casting or isostatic pressing, rather than conventional powder pressing.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Esmailzadeh Ashini A, Feizpour M, Barzegar Bafrooei H. Reverse engineering and bottleneck analysis for domestic production of tundish nozzles used in steel continuous casting. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Oct 23;12(8):1-19. doi: 10.22034/ijme.2025.540633.2121 [In Persian]

۱- مقدمه

فرایند فولادسازی اساساً بر اکسیداسیون و حذف عناصر زائد مانند منگنز، سیلیسیم و فسفر از آهن استوار است تا ترکیب نهایی به سطح مطلوب برسد. این عناصر که تمایل شدیدی به واکنش با اکسیژن دارند، با تشکیل اکسیدهایی پایدار به صورت سرباره بر سطح آهن مذاب جمع شده و از آن جدا می‌شوند.

گرچه در جهان روش‌های متنوعی برای تولید فولاد وجود دارد، اما یکی از پیشرفته‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها، ریخته‌گری پیوسته است. از دهه ۱۹۵۰، با معرفی این فناوری، تحولی بزرگ در فرایندهای ریخته‌گری رخ داد. بر اساس گزارش انجمن جهانی فولاد، در سال ۲۰۰۹ بیش از ۹۰ درصد فولاد دنیا به این روش تولید شده است. این در حالی است که طبق گزارش بنیاد بین‌المللی فولاد و آهن در سال ۱۹۷۱، سهم این روش تنها حدود ۶ درصد بود [۱]. در سال ۲۰۲۴، از میان حدود ۱۹۰۰ میلیون تن فولاد تولیدی جهان، نزدیک به ۹۵ درصد با این روش ساخته شد [۱]. این رشد چشمگیر نه تنها بیانگر سرعت گسترش فناوری ریخته‌گری پیوسته است، بلکه مزایای فراوان آن را نیز آشکار می‌کند؛ مزایایی که استفاده از این فرایند را در مقیاس وسیع صنعتی اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در این روش، فلز پس از ذوب در کوره، از طریق پاتیل یا کانالی با پوشش نسوز به مخزنی به نام تاندیش منتقل می‌شود. تاندیش وظیفه دارد در زمان تعویض پاتیل، جریان مذاب به قالب‌های مداوم را بدون وقفه ادامه دهد. این مخزن که از ورق‌های فولادی ساخته و با لایه‌های نسوز پوشانده شده است، نقش اساسی در تقسیم و هدایت فولاد مذاب به قالب‌ها ایفا می‌کند.

ظرفیت یک تاندیش با ابعاد تقریبی یک و نیم متر در سه متر (معادل مساحت کف ۴/۵ متر مربع)، در ارتفاع ۵۳۰ میلی‌متر حدود ۱۸ تن و در بیشترین ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر نزدیک به ۲۲ تن است [۲]. یکی از مهم‌ترین وظایف تاندیش، کنترل سرعت ریخته‌گری است که با تنظیم ارتفاع مذاب درون آن انجام می‌شود. افزون بر این، پیش از ریختن مذاب از پاتیل به درون تاندیش، لازم است همانند پاتیل، این مخزن نیز به‌طور کامل پیش‌گرم شود [۲]. نازل تاندیش قطعه‌ای کلیدی است که در کف تاندیش قرار می‌گیرد و وظیفه اصلی آن هدایت مذاب از تاندیش به قالب ریخته‌گری مداوم است. این نازل‌ها در انواع مختلف ساخته می‌شوند و نوع آن‌ها بر اساس مدت زمان ریخته‌گری تعیین می‌گردد. نازل تاندیش از بخش‌های گوناگونی تشکیل شده است که هر یک وظیفه‌ای مشخص در هدایت مذاب، حفظ دما و تضمین کیفیت فرایند بر عهده دارند. طراحی دقیق این اجزا اهمیت فراوانی دارد، زیرا تنها در این صورت می‌توان اطمینان یافت که جریان فلز مذاب به شکلی یکنواخت و بدون اختلال وارد قالب نهایی شود و از بروز مشکلاتی مانند سایش، اکسیداسیون یا آلودگی مذاب جلوگیری گردد. به طور کلی، یک نازل تاندیش از پنج بخش اصلی تشکیل شده است.

۱- مجرای ورودی^۱: بخشی است که فلز مذاب از طریق آن وارد نازل می‌شود. این قسمت معمولاً به‌طور مستقیم یا از طریق یک لوله به تاندیش متصل است. طراحی مجرای ورودی باید به‌گونه‌ای باشد که مانع ورود گازها یا ناخالصی‌های هوا به مذاب شود. به همین دلیل سطح آن کاملاً صاف و هم‌تراز بوده و برای کاهش اصطکاک و بهبود عملکرد، با لایه‌ای نازک از گرافیت روانکاری می‌شود.

۲- روکش فلزی نازل^۲: روکش فلزی به‌منظور محافظت از بدنه نازل در برابر اکسیداسیون، سایش و خوردگی ناشی از تماس مستقیم با مذاب به کار می‌رود. این بدنه باید با اجزای نسوز سازگار باشد، محتوای کربن کمی برای شکل‌پذیری از خود نشان دهد و امکان ساخت مقرون به صرفه را فراهم کند. این روکش‌ها عموماً از فولادهای آلیاژی مقاوم در برابر حرارت و سایش مانند فولادهای کروم-مولیبدن دار، آلیاژهای نیکل-کروم یا فولاد ضد زنگ ساخته می‌شوند.

۳- لایه نسوز یا سرامیکی^۳: این لایه در داخل نازل قرار می‌گیرد و وظیفه اصلی آن محافظت در برابر دماهای بسیار بالا و جلوگیری از انتقال حرارت به بیرون است. لایه نسوز معمولاً از مواد سرامیکی یکپارچه یا به‌صورت کامپوزیتی از ترکیباتی مانند آلومینا، سیلیکات کلسیم یا فسفات‌ها ساخته می‌شود. این لایه باید مقاومت بالایی در برابر شوک حرارتی و پایداری شیمیایی داشته باشد. برای دوام در دماهای بسیار بالا، باید ترکیب فازی فرمول‌بندی شده‌ای (مثلاً از آلومینا، مولایت و سیلیس) داشته باشد. علاوه بر این، برای اطمینان از عملکرد، باید از اتصال محکمی با تویی نازل و نگهدارنده فلزی برخوردار باشد.

¹ Inlet

² Metallic Holder

³ Refractory Lining

۴- بدنه اصلی نازل^۱: این بخش که به نام توپی نازل نیز شناخته می‌شود، به‌عنوان محفظه عبور فلز مذاب عمل می‌کند و باید در برابر دما، سایش شدید و شوک حرارتی مقاومت بسیار بالایی داشته باشد. برای ساخت بدنه اصلی نازل اغلب از سرامیک‌های یکپارچه با چگالی بالا استفاده می‌شود. شکل پیچیده آن برای دقت و دوام نیاز به روش‌های پیشرفته تولید مانند ریخته‌گری دوغابی یا پرس ایزواستاتیک دارد.

۵- نازل خروجی^۲: بخش انتهایی نازل است که مذاب از آن عبور کرده و به قالب ریخته‌گری هدایت می‌شود. طراحی دقیق این قسمت اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا باید جریان مذاب را به شکلی یکنواخت، بدون گرفتگی و با حداقل آشفستگی منتقل کند. ابعاد و شکل ویژه نازل خروجی نقش مهمی در کنترل جریان مذاب ایفا می‌کند.

مهندسی معکوس در حوزه مهندسی مواد به معنای تجزیه و تحلیل نظام‌مند یک ماده یا قطعه برای درک ترکیب شیمیایی، ساختار، روش‌های فرآوری و عملکرد آن است. این فرایند معمولاً با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از آزمون‌های مخرب و غیرمخرب - از جمله میکروسکوپ‌های مختلف، طیف‌سنجی، تحلیل‌های شیمیایی و آزمون‌های مکانیکی - صورت می‌گیرد تا ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی ماده شناسایی شود. بررسی دقیق ریزساختار، تعیین فازهای تشکیل‌دهنده و تحلیل ترکیب شیمیایی، این امکان را فراهم می‌کند که مهندسان شناختی دقیق از فرایند تولید و اهداف طراحی اولیه به دست آورند. چنین دانشی به آن‌ها اجازه می‌دهد تا قطعه را بازتولید کنند، مسیرهای بهبود احتمالی را شناسایی نمایند یا علل موفقیت و شکست آن را در یک کاربرد خاص تحلیل کنند. افزون بر این، مهندسی معکوس می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی محصولات رقبای، تشخیص موارد احتمالی نقض پتنت‌ها، یا توسعه مواد جدید و ارتقایافته با خواص بهینه مورد استفاده قرار گیرد. بدین ترتیب، این دانش در نوآوری، کاهش هزینه‌ها و ایجاد مزیت رقابتی در صنایع گوناگون نقشی اساسی ایفا می‌کند.

پژوهش حاضر که با همکاری شرکت فولاد کاوه جنوب کیش در دانشگاه میبد تعریف شده است، با هدف پاسخ به این پرسش انجام گرفته است که آیا می‌توان به دانش فنی تولید نازل تاندیش با کیفیتی معادل نمونه‌های خارجی دست یافت؛ به‌گونه‌ای که این قطعه با دارا بودن ویژگی‌های مشابه، جایگزینی مطمئن برای نمونه‌های وارداتی در صنعت ریخته‌گری باشد و کشور را از وابستگی به واردات بی‌نیاز کند. بر همین اساس، مهندسی معکوس یک نازل تولید کشور چین مدنظر قرار گرفت و این قطعه به بخش‌های مختلف تفکیک شد تا ریزساختار، ترکیب و خواص فیزیکی هر بخش مورد بررسی دقیق قرار گیرد. هدف از این کار، شناسایی مواد به‌کاررفته در قطعه و فراهم کردن بستر لازم برای تولید داخلی آن در آینده است.

هرچند در ایران نیز تلاش‌هایی در این زمینه انجام شده است - به عنوان نمونه می‌توان به اختراع ثبت‌شده آقای سعید برادران در سال ۱۳۹۹ با عنوان «تولید مغزی سرامیکی کامپوزیتی نازل‌های تاندیش، درونی/بیرونی پاتیل و صفحات کشویی اسلایدگیت در ریخته‌گری مداوم» اشاره کرد که در فرمولاسیون آن از ۶۵٪ زیرکون (سیلیکات زیرکونیم)، ۳۰٪ آلومینای تابولار، و ۵٪ بال‌کلی استفاده شده است - اما تمرکز این پژوهش بیش از هر چیز بر شناسایی دقیق و علمی اجزای یک نمونه خارجی است که هم‌اکنون به طور گسترده در صنعت فولاد کشور به کار گرفته می‌شود. در مرحله بعد، تلاش خواهد شد با معرفی مواد یا ارائه فرمولاسیون مناسب برای هر بخش، گلوگاه‌های تولید صنعتی و بومی‌سازی این قطعه در ایران شناسایی و تحلیل شود.

۲- روش پژوهش

تصویر نازل تاندیش وارداتی از کشور چین که فرایند مهندسی معکوس آن در این پژوهش بررسی شده است، در شکل ۱ آمده است. همچنین نقشه ترسیمی این قطعه در نرم‌افزار سالیدورکس در شکل ۲ ارائه شده است. برای انجام مهندسی معکوس، سه بخش اصلی از این قطعه انتخاب گردید: (۱) بدنه اصلی یا نگهدارنده فلزی نازل تاندیش، (۲) نشیمنگاه نازل (جرم نسوز)، و (۳) توپی یا مغزی نازل. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، نازل برش داده شد و سه بخش یادشده مانت و پولیش گردیدند تا برای مطالعه با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ (SEM) همراه با آشکارساز EDS^۴ مورد استفاده قرار گیرند. تصویر نمونه‌های مانت‌شده در شکل ۳ ارائه شده است.

¹ Insert

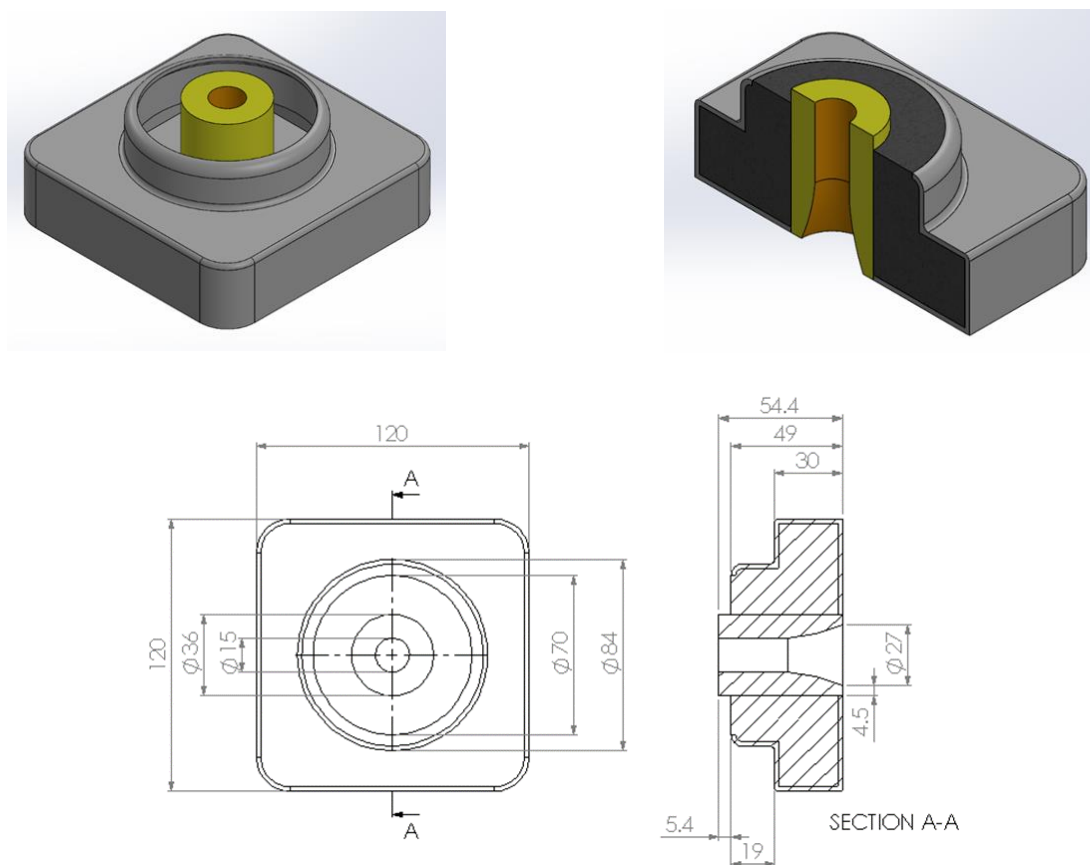
² Outlet

³ Scanning Electron Microscope

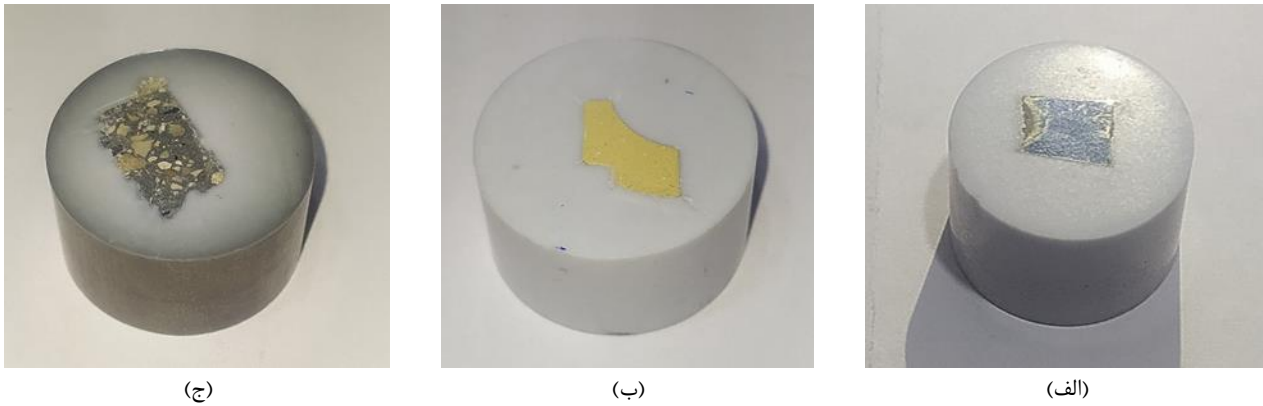
⁴ Energy Dispersive Spectroscopy



شکل ۱ تصویری از زوایای مختلف از قطعه نازل تاندیش ساخت کشور چین



شکل ۲ تصویر ترسیم شده از قطعه نازل تاندیش با ابعاد واقعی با استفاده از نرم‌افزار سالی‌دورک



شکل ۳ مانع (الف) نگهدارنده فلزی قطعه نازل تاندیش، (ب) توپی نازل و (ج) نشیمنگاه توپی (جرم نسوز)

در فرایند آماده‌سازی، برای نمونه‌های سرامیکی شامل توپی نازل و جرم نسوز، از کاغذ سنباده تا شماره ۳۰۰۰ و خمیر الماسه جهت پولیش استفاده شد. در مورد نگهدارنده فلزی، علاوه بر پولیش، از محلول نایتال ۵ درصد نیز برای اچ سطح نمونه‌ها به کار گرفته شد تا ریزساختار با وضوح بیشتری آشکار گردد.

اندازه‌گیری چگالی نمونه‌ها در شرکت فرآورده‌های نسوز پارس یزد و بر اساس روش مشابه استاندارد ASTM C373 انجام گرفت. در این روش، ابتدا نمونه‌ها در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد در داخل خشک‌کن قرار داده شدند تا رطوبت آن‌ها به طور کامل تبخیر و نمونه به حالت خشک برسد. سپس، وزن خشک^۱ نمونه اندازه‌گیری شد (W_D). در مرحله بعد، نمونه درون دسیکاتوری قرار داده شد که در آن از نفت به عنوان مایع استفاده می‌شد و دستگاه به شیر خلا متصل بود. پس از یک ساعت قرارگیری نمونه در نفت و تحت شرایط خلا نسبی، نمونه از دسیکاتور خارج گردید و سپس سطح آن با پارچه‌ای آغشته به نفت، به آرامی از باقی‌مانده نفت پاک شد. این وزن به عنوان وزن اشباع^۲ ثبت می‌شود (W_S)؛ سپس وزن نمونه در حالی که داخل سیال نفت غوطه‌ور است نیز به عنوان وزن غوطه‌وری^۳ ثبت می‌شود (W_I).

چگالی بالک^۴ B.D. یا چگالی ارشمیدس (با واحد g/cm^3)، چگالی ظاهری A.S.G. (با واحد g/cm^3)، درصد جذب آب W.A. (با واحد %)، و درصد تخلخل ظاهری A.P. (با واحد %) بر اساس فرمول‌های شماره ۱ تا ۴ محاسبه می‌شود. در محاسبه چگالی بالک، حجم کل قطعه شامل مجموع حجم ذرات تشکیل‌دهنده، تخلخل‌های باز و تخلخل‌های بسته در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، تمامی تخلخل‌های موجود در قطعه (چه باز و چه بسته) در محاسبه حجم کلی لحاظ می‌شوند. اما در محاسبه چگالی ظاهری، تنها حجم تخلخل‌های بسته وارد محاسبه می‌شود؛ بدین صورت که حجم تخلخل‌های باز از حجم کل نمونه کسر شده و صرفاً حجم ذرات و تخلخل‌های بسته مبنای محاسبه قرار می‌گیرند. به همین دلیل، مقدار چگالی ظاهری معمولاً بالاتر از چگالی بالک گزارش می‌شود.

$$\text{Bulk Density (B.D.)} = \frac{W_D}{W_S - W_I} \times \rho_{\text{petroleum}} \quad (1)$$

$$\text{Apparent Specific Gravity (A.S.G.)} = \frac{W_D}{W_D - W_I} \times \rho_{\text{petroleum}} \quad (2)$$

$$\% \text{ Water Absorption (W.A.)} = \frac{W_S - W_D}{W_D} \times \frac{100}{\rho_{\text{petroleum}}} \quad (3)$$

$$\% \text{ Apparent Porosity (A.P.)} = \frac{W_S - W_D}{W_S - W_I} \times 100 \quad (4)$$

$\rho_{\text{Petroleum}}$ در تمام روابط فوق، چگالی نفت است که عموماً برابر 0.82 g/cm^3 در نظر گرفته می‌شود. دلیل استفاده از نفت به جای آب یا الکل آن است که نفت با اکسیدهای موجود در ترکیب مواد دیرگداز واکنش نمی‌دهد، در حالی که به عنوان مثال اکسید منیزیم در تماس با آب واکنش داده و اصطلاحاً دچار هیدراته شدن می‌شود. افزون بر این، به کارگیری خلا موجب می‌شود نفت به سادگی در تخلخل‌های باز و سطوح نمونه نفوذ کند و فرایند اشباع شدن تخلخل‌ها با دقت و یکنواختی بیشتری انجام گیرد.

¹ Dry Weight

² Saturation Weight

³ Immerse Weight

⁴ Bulk Density: BD

در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN که مجهز به تصویرسازهای SE^۱ و BSE^۲ و آنالیز عنصری EDS بود استفاده شد. تصاویر و آنالیزهای مورد نظر با استفاده از دستگاه‌های موجود در دانشکده مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه علم و صنعت ایران تهیه شد. برای بررسی‌های فازی از بخش‌های مختلف قطعه نازل تاندیش، آنالیز پراش پرتوی ایکس (XRD^۳) انجام شده است. این آنالیز با استفاده از دستگاه Brucker Advanced D8 موجود در کشور فنلاند انجام گرفت. بازه زوایای مورد بررسی بین ۱۰ تا ۱۰۰ درجه در نظر گرفته شد و گام اندازه‌گیری برابر با ۰/۱ درجه تعیین گردید. مدت زمان توقف در هر گام نیز یک ثانیه انتخاب شد. برای شناسایی فازهای موجود، از نرم‌افزار X'pert HighScore Plus استفاده شد. برای ارزیابی آنالیز عنصری ترکیبات از تکنیک فلورسانس پرتوی ایکس (XRF^۴) مدل S8 TIGER ساخت شرکت Brucker استفاده شد. در روشی دیگر برای شناسایی دقیق عناصر موجود در نمونه، از تست ICP-OES^۵ مدل 5800 ساخت شرکت Agilent استفاده شد. به طور مشخص، برای شناسایی محتوای کربن و گوگرد نگهدارنده فلزی نیز از دستگاه آنالیز کربن و گوگرد ساخت شرکت LECO مدل CS744 استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

آزمون‌های انجام‌شده بر روی سه بخش اصلی شامل: (۱) آنالیزهای عنصری و فازی، (۲) تصاویر و آنالیزهای ریزساختاری و (۳) اندازه‌گیری چگالی برای هر سه قسمت نازل تاندیش صورت گرفت. نتایج مربوط به هر بخش در ادامه ارائه شده است.

۳-۱- آنالیزهای عنصری و فازی

نتایج آنالیز کوانتومتری بر روی نگهدارنده فلزی نازل نشان داد که درصد آهن در نمونه حداقل ۹۹/۵٪ است. به منظور شناسایی سایر عناصر موجود در این بخش، آنالیز شیمیایی نیمه‌کمی XRF بر روی نمونه انجام گرفت. این آنالیز در دو حالت صورت پذیرفت: یکی بر روی نمونه فقط پولیش‌شده و دیگری بر روی نمونه پولیش و اچ‌شده. نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از اچ، درصد آهن در نمونه افزایش یافته (از ۹۹/۲۷٪ به ۹۹/۷۷٪) که این تغییر ناشی از حذف عناصری است که معمولاً در مرزخانه‌ها رسوب می‌کنند؛ عناصری همچون Si، Ti، V، Zn و Zr. به عنوان مثال، درصد سیلیسیم از ۰/۲۴٪ به ۰/۱۰٪ کاهش یافته است. به منظور دستیابی به مقدار دقیق عنصر منگنز از تست ICP-OES و مقدار سولفور و کربن از دستگاه LECO استفاده شد. درصد وزنی این عناصر به ترتیب برابر با ۰/۱۴٪، ۰/۰۵٪ و ۰/۰۵۵٪ به دست آمد. نتایج مربوط به عنصر منگنز در آزمون ICP انطباق بسیار خوبی با نتایج آنالیز XRF نشان داد. اگر از میزان تئوری کربن حل شده در آهن آلفا - فریت (۰/۰۰۸٪) صرف نظر گردد، می‌توان محاسبه نمود که ۰/۰۵۵ درصد کربن آزاد می‌تواند معادل ۰/۰۸۳٪ وزنی فاز کاربید آهن (سمنتیت) مطابق محاسبه کاربرد آهن در نمونه نگهدارنده فلزی ارزیابی شود. در ادامه، تلاش می‌شود تا با تکنیک پراش پرتوی ایکس (XRD)، حضور فاز $\frac{0.055 \times 100}{6.67} = 0.83 \text{ wt. \% Fe}_3\text{C}$ در نظر گرفته شود.

جدول ۱ آنالیز نیمه‌کمی XRF از نگهدارنده فلزی نازل تاندیش

نمونه	عنصر پایه	درصد وزنی عناصر موجود بر اساس دقت XRF											
		Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Si	Ti	V	Zn	Zr
پولیش شده	Fe	<					<						
		L	0.013	99.2759	0.1419	0.0008	L	0.0191	0.2428	0.0022	0.0113	0.0173	0.0011
		O					O						
		D				D							
پولیش و اچ شده	Fe	0.0035	0.0076	99.7737	0.1236	0.0012	0.0516	0.0048	0.0101	<	<	<	<
										L	L	L	L
										O	O	O	O
									D	D	D	D	

LOD: Limit of Detection

¹ Secondary Electron: SE

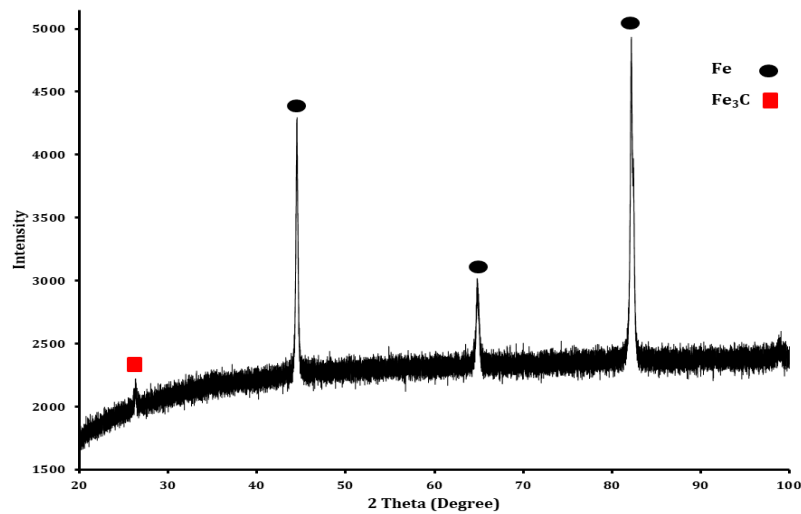
² Back Scattered Electron: BSE

³ X-ray Diffraction: XRD

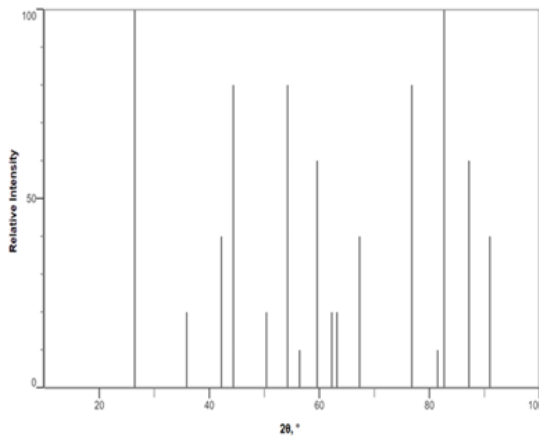
⁴ X-ray Fluorescence: XRF

⁵ Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer

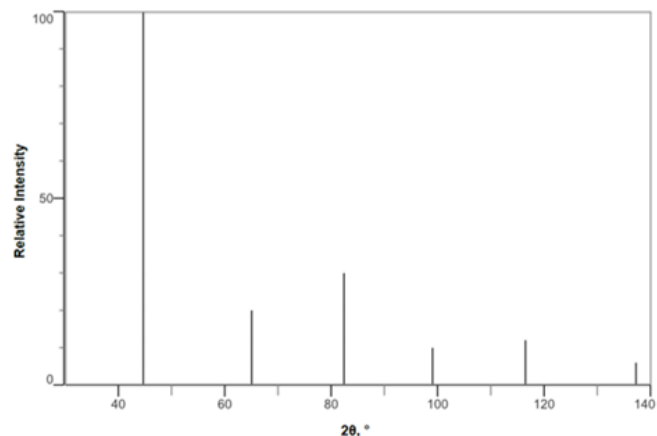
در شکل ۴، الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نگهدارنده فلزی نازل نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فاز اصلی نمونه فریت (α -Fe) است که با کارت استاندارد اشعه ایکس به شماره PDF Card No.: 00-006-0696 انطباق دارد. از طرفی، بررسی‌های بیشتر نشان داد که فاز کاربید آهن (Fe_3C) با کارت اشعه ایکس به شماره PDF Card No.: 00-003-0411 نیز به صورت جزئی با یک پیک کوچک که در زاویه $2\theta \approx 26.3^\circ$ درجه وجود دارد، در فلز نگهدارنده نازل تاندیش مشاهده می‌شود. این پیک مربوط به پیک با شدت نسبی ۱۰٪ این فاز است. اطلاعات مربوط به ساختار کریستالی این فازها را می‌توان در شکل‌های ۵-الف (فلز آهن) و ۵-ب (فاز میانی Fe_3C) مشاهده کرد. تشخیص این فاز در الگوی XRD با وجود درصد بسیار اندک آن (کمتر از یک درصد بر اساس نتیجه به دست آمده بر اساس اطلاعات دستگاه LECO برای آنالیز کربن)، تنها به دلیل کیفیت بسیار بالای الگوی پراش به دست آمده امکان پذیر شده است؛ در غیر این صورت، در شرایط متعارف آزمون پراش پرتو ایکس، شناسایی فازهایی با چنین مقادیر ناچیز معمولاً امکان پذیر نیست.



شکل ۴ الگوی پراش اشعه ایکس نگهدارنده فلزی نازل تاندیش



(ب) کاربید آهن (سمنتیت)



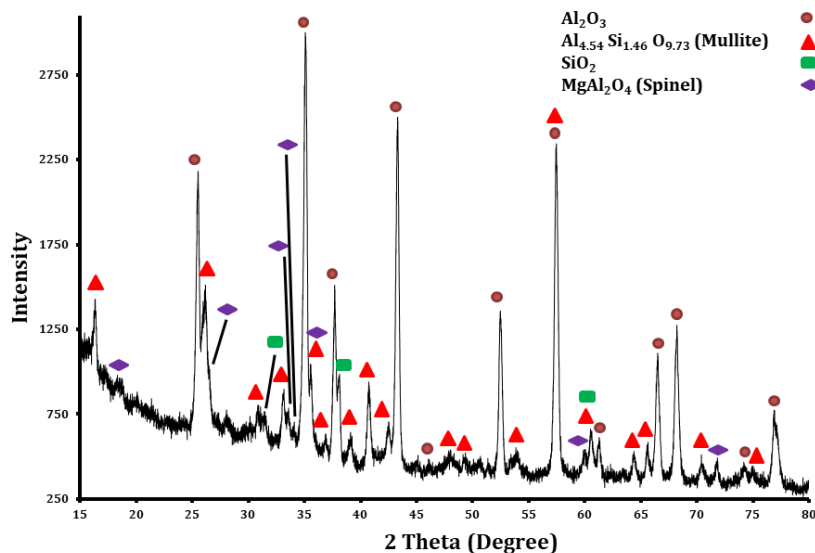
(الف) آهن آلفا (فریت)

شکل ۵ کارت‌های اشعه ایکس فازهای الف (α -Fe) و ب (Fe_3C)

نتایج آنالیز شیمیایی جرم نسوز با استفاده از دستگاه XRF به دست آمد. بر اساس داده‌ها، این جرم دارای درصد بالایی از اکسید آلومینیوم است که می‌تواند نشان‌دهنده استفاده از آلومینا و همچنین مواد اولیه رسی در فرمولاسیون آن باشد. علاوه بر این، درصد اندکی اکسید زیرکونیم نیز شناسایی شده است که با توجه به حضور اکسید سیلیسیم، می‌تواند ناشی از وجود فاز زیرکون ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$) باشد. البته احتمال افزودن زیرکونیای خالص نیز وجود دارد، اما با توجه به قیمت بالای آن، فرضیه اول محتمل‌تر به نظر می‌رسد. همچنین، وجود مقدار کمی اکسید منیزیم می‌تواند نشان‌دهنده استفاده از زیرکونیای پایدار شده با منیزیا در ترکیب جرم باشد.

در این آنالیز، درصد قابل توجهی اکسید آهن نیز مشاهده شد که می‌تواند ناشی از استفاده از مواد رسی در فرمولاسیون جرم باشد؛ چرا که اکسید آهن به‌طور معمول به‌صورت عمدی به ترکیب اضافه نمی‌شود. علاوه بر این، مقدار اندکی اکسید تیتانیوم نیز وجود دارد که می‌توان آن را از دو منظر تفسیر کرد: نخست، به‌عنوان افزودنی جهت بهبود فرایند زینتر و افزایش چقرمگی سامانه‌های غنی از آلومینا از طریق تشکیل فاز تیالیت ($Al_2O_3 \cdot TiO_2$) و دوم، به‌عنوان ناخالصی موجود در مواد رسی اولیه. با توجه به درصد پایین TiO_2 ، احتمال منشأ دوم بیشتر است، هرچند این دو پدیده می‌توانند به‌صورت هم‌افزا نیز عمل کنند. حضور P_2O_5 در آنالیز شیمیایی نیز نشان می‌دهد که جرم نسوز مورد بررسی از نوع باند فسفات‌هاست. این نوع جرم‌ها به دلیل استفاده از فسفات‌ها (اغلب اسید فسفریک) به‌عنوان چسب یا بایندر، چنین نامیده می‌شوند. فسفات‌ها علاوه بر ایجاد استحکام اولیه در دمای محیط، مقاومت حرارتی بالایی را نیز برای این جرم‌ها فراهم می‌کنند.

الگوی پراش پرتو ایکس جرم نسوز در شکل ۶ ارائه شده است. بررسی الگو نشان می‌دهد که فازهای اصلی تشکیل‌دهنده عبارت‌اند از: آلفا-آلومینا (Al_2O_3) با PDF Card No.: 04-025-2780، مولایت ($Al_{4.54}Si_{1.46}O_{9.73}$) با PDF Card No.: 01-079-1456، سیلیس (SiO_2) با PDF Card No.: 01-075-3168 و اسپینل ($MgAl_2O_4$) با PDF Card No.: 04-028-4858. بر اساس نتایج آنالیز شیمیایی، داده‌های فازی و مشاهدات چشمی، پیش‌بینی می‌شود که برای تهیه این جرم از آلومینای تابولار با اندازه ذرات مختلف، ترکیبات رسی (بال کلی و/یا کائولن)، اسید فسفریک به‌عنوان منبع P_2O_5 ، زیرکون ($ZrSiO_4$) و گرافیت استفاده شده باشد. افزودن گرافیت نیز موجب بهبود هدایت حرارتی در این نوع جرم‌های ریختنی می‌شود.



شکل ۶ الگوی پراش اشعه ایکس جرم نسوز و شناسایی فازهای موجود در آن

آنالیز شیمیایی توپی نازل با استفاده از تکنیک XRF انجام شد و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این آنالیز، توپی نازل تقریباً به‌طور کامل از اکسید زیرکونیم (ZrO_2) تشکیل شده است (۹۷٫۵٪)، و مهم‌ترین افزودنی‌های موجود در آن شامل اکسیدهای منیزیم و کلسیم (در مجموع حدود ۲٫۱٪) هستند که به‌منظور پایدارسازی فاز زیرکونیا به ترکیب اضافه شده‌اند.

جدول ۲ آنالیز شیمیایی بر مبنای نتایج XRF از توپی نازل تاندیش

نام اکسید	ZrO ₂	MgO	CaO	TiO ₂	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅
درصد وزنی	97.5	1.4	0.66	0.17	0.1	0.09	< 0.05	< 0.05	< 0.05

پس از شناسایی ترکیب شیمیایی، برای بررسی نوع زیرکونیای به‌کاررفته در ساخت توپی نازل و شناسایی فازهای موجود، از آزمون XRD استفاده شد. همان‌گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، توپی نازل از جنس زیرکونیای نیمه‌پایدار است و حاوی دو فاز زیرکونیای

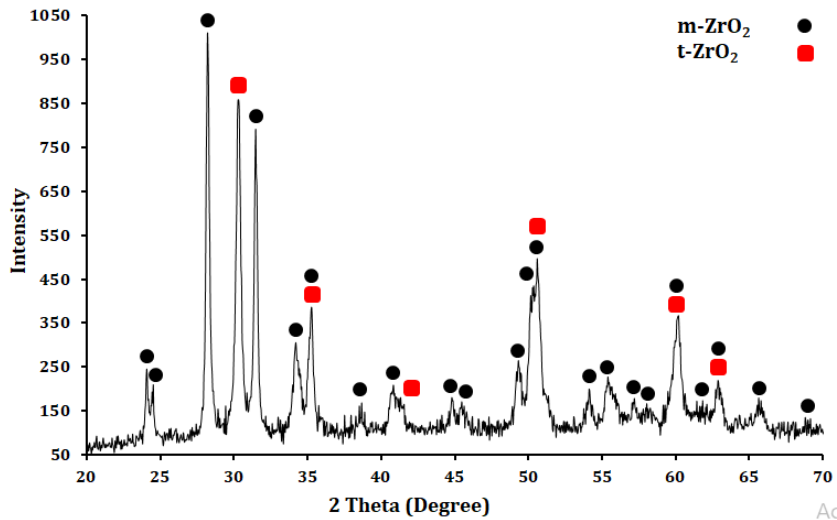
مونوکلینیک ($m\text{-ZrO}_2$) و تتراگونال ($t\text{-ZrO}_2$) می‌باشد. m مخفف مونوکلینیک و t مخفف تتراگونال است. ساختار بلوری این فازها به ترتیب با کارت‌های پراش پرتو ایکس شماره PDF Card No.: 50-1089 و PDF Card No.: 37-1484 مطابقت دارد. شبکه بلوری و پارامتر شبکه این فازها به صورت زیر است؛

زیرکونیای مونوکلینیک ($P21/a$ (14):

$$a = 5,3129 \text{ \AA}, b = 5,2125 \text{ \AA}, c = 5,1471 \text{ \AA}, \alpha = 90,0^\circ, \beta = 99,218^\circ, \gamma = 90,0^\circ, V = 140,7 \text{ \AA}^3$$

زیرکونیای تتراگونال ($P42/nmc$ (137):

$$a = 3,5984 \text{ \AA}, b = 3,5984 \text{ \AA}, c = 5,152 \text{ \AA}, \alpha = 90,0^\circ, \beta = 90,0^\circ, \gamma = 90,0^\circ, V = 66,7 \text{ \AA}^3$$



شکل ۷ الگوی پراش اشعه ایکس توپی نازل تاندیش و فازهای آن

همچنین مشاهده می‌شود که بر اساس نتایج آنالیز شیمیایی، پایدارسازی زیرکونیا از طریق افزودن MgO و CaO صورت گرفته است. از آنجا که هر دو فاز مونوکلینیک و تتراگونال در نمونه حضور دارند، پایدارسازی به‌طور کامل انجام نشده و تنها به‌صورت جزئی صورت گرفته است. این نوع ماده در ادبیات علمی با نام PSZ^1 و در ایران با عنوان «زیرکونیای نیمه‌پایدار» شناخته می‌شود. زیرکونیای نیمه‌پایدار به دلیل مقاومت بالا در برابر دما، خوردگی، سایش و شوک حرارتی، به‌طور گسترده در کاربردهای دمابالا و شرایط با خوردگی شدید استفاده می‌شود. این ماده با افزودن اکسیدهایی مانند ایتریم یا منیزیم و کلسیم پایدار می‌شود و عملکرد مطلوب نازل را در شرایط دمایی شدید تضمین می‌کند. ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی عالی زیرکونیا باعث افزایش طول عمر و بهبود کیفیت فرایند ریخته‌گری مداوم می‌شود [۳-۴].

۳-۲- تصاویر و آنالیزهای ریزساختاری

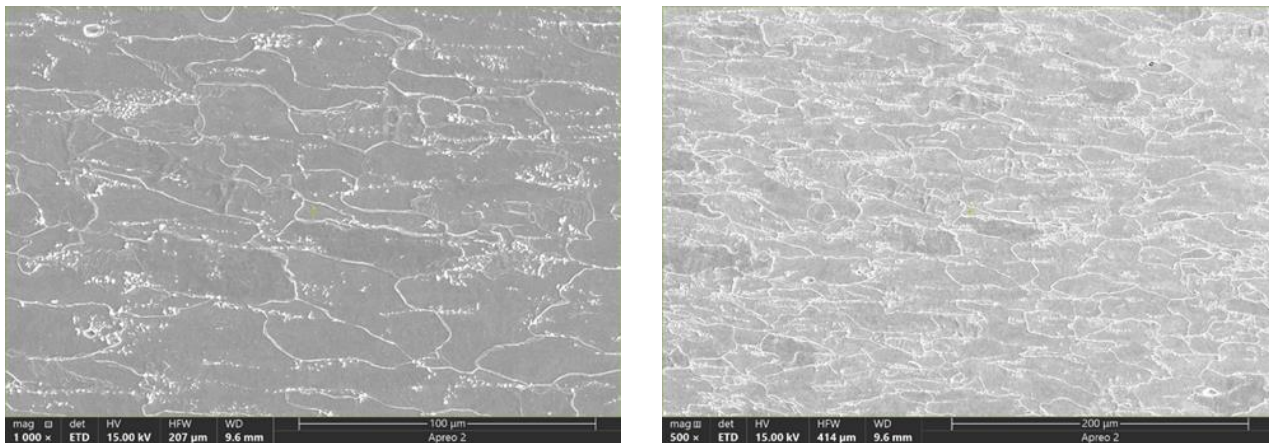
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نگهدارنده فلزی در دو بزرگنمایی $500\times$ و $1000\times$ در شکل ۸ نمایش داده شده است. در این تصاویر، دانه‌ها و مرز دانه‌ها به‌وضوح قابل مشاهده هستند. خطوط سفید مرز دانه‌ها هستند. همچنین در شکل ۹، نقشه عنصری^۲ به‌دست آمده از EDS ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که عنصر آهن به‌صورت گسترده در سراسر آلیاژ توزیع شده است و در کنار آن، عناصری مانند اکسیژن، منگنز، آلومینیوم و سیلیسیم نیز با شدت کمتری در کل آلیاژ مشاهده می‌شوند.

آنالیز عنصری در نقاط مشخص شده با علامت + در شکل ۱۰ انجام شد و نتایج آن در جدول ۳ برای نقاط ۳۰ تا ۳۴ آورده شده است. با توجه به اینکه تمرکز رسوب عناصر معمولاً در مرز دانه‌ها رخ می‌دهد، ارزیابی آنالیز شیمیایی در این نواحی مورد توجه قرار گرفت. داده‌ها نشان می‌دهد که درصد آهن در محدوده ۹۹/۰۴ تا ۹۹/۴۵٪ قرار دارد و بخش عمده عنصر باقیمانده مربوط به اکسیژن

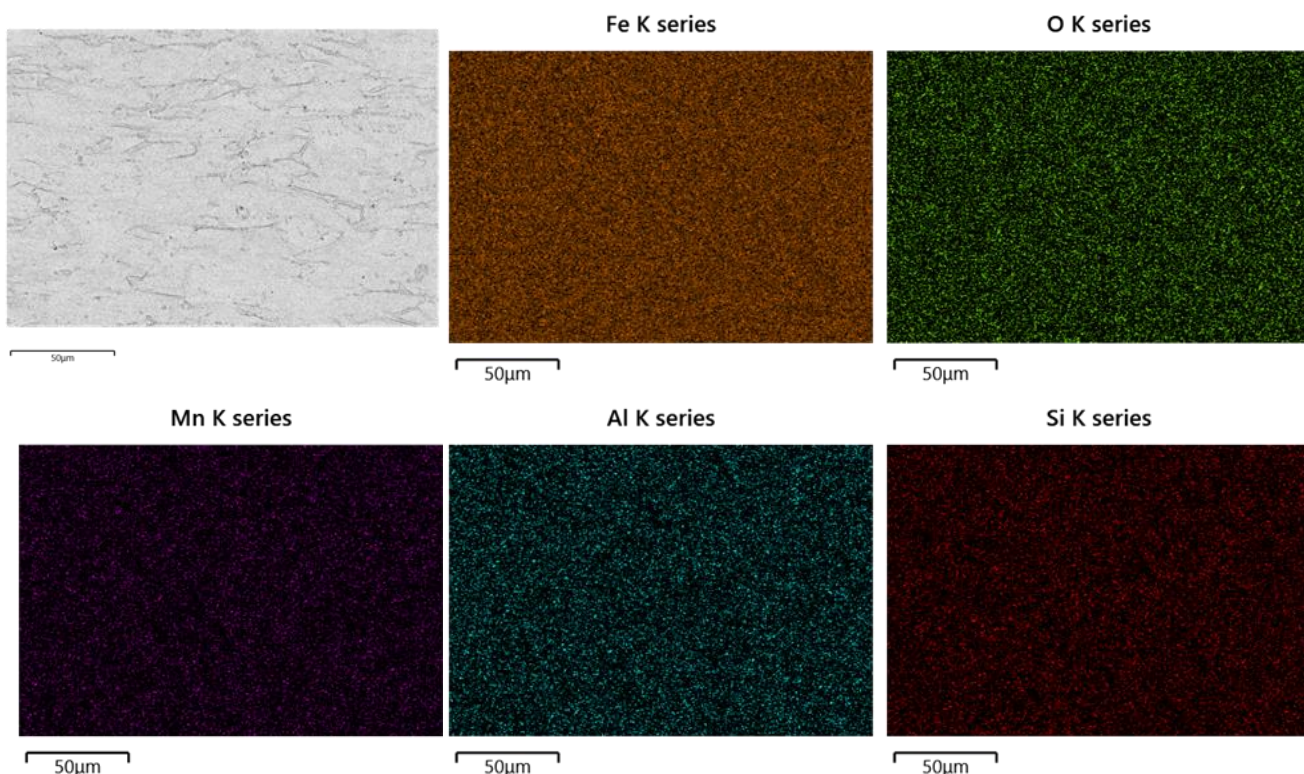
¹ Partially Stabilized Zirconia

² Elemental Map

است. این موضوع به احتمال زیاد ناشی از اکسیداسیون سطحی نمونه‌ها در جریان آماده‌سازی و پولیش است. علاوه بر این، اثراتی از عناصری نظیر آلومینیوم و سیلیسیم نیز مشاهده شد که پیش‌تر حضور آن‌ها در آنالیز ICP نیز گزارش شده بود. به طور مثال، شکل ۱۱ طیف EDS از منطقه مشخص شده با نام ۳۴ در شکل ۱۰ که مستعد تشکیل فازهای ثانویه غنی از عناصر آلومینیوم، سیلیسیم و اکسیژن است را نشان می‌دهد.



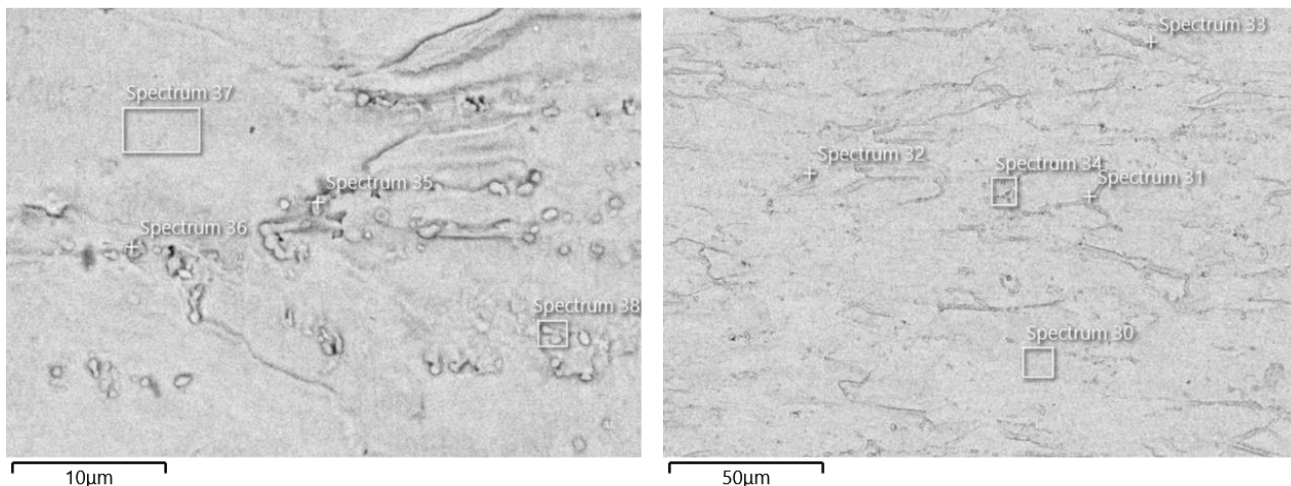
شکل ۸ تصویر SEM از نگهدارنده فلزی در دو بزرگنمایی ۵۰۰X (شکل راست) و ۱۰۰۰X (شکل چپ)



شکل ۹ تصویر map از عناصر آهن، اکسیژن، منگنز، آلومینیوم و سیلیسیم در نگهدارنده فلزی

به‌طور مشخص، آنالیز در منطقه ۳۷ از داخل یک دانه و در منطقه ۳۸ بیشتر از ناحیه مرزدانه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در ناحیه‌ای با سهم بیشتر مرزدانه‌ها، درصد اکسیژن بالاتر از ناحیه‌ای است که صرفاً از داخل دانه مورد بررسی قرار گرفته است. این موضوع بیانگر آن است که مرزدانه‌ها احتمالاً بیشتر دچار اکسیداسیون شده‌اند؛ نکته‌ای که غیرطبیعی هم نیست، زیرا به دلیل ضعف پیوندها در مرزدانه‌ها، احتمال تشکیل ترکیبات جدید در این نواحی بیشتر است.

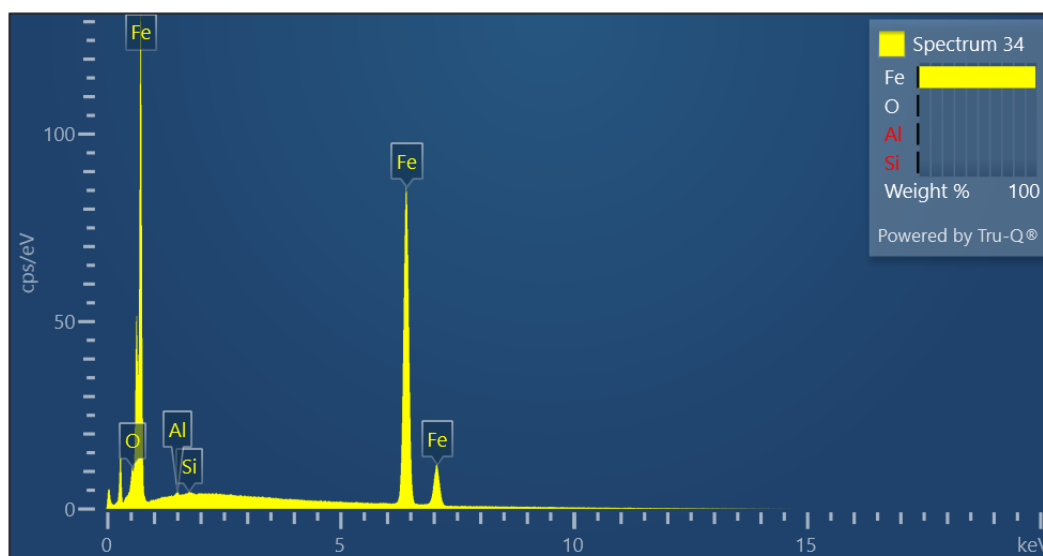
با این حال، آنچه آنالیز EDS به‌طور دقیق نشان داده است، درصد وزنی عنصر آهن است که در بیشترین مقدار خود به ۹۹٫۴۵٪ (طیف شماره ۳۰) رسیده است. این مقدار با نتایج آزمون کوانتومتری نیز همخوانی دارد که برای نمونه به‌طور میانگین حدود ۹۹٫۵٪ آهن را گزارش کرده بود؛ هرچند در آن آزمون درصد مربوط به کل نمونه اندازه‌گیری شده بود، نه یک نقطه خاص.



شکل ۱۰ تصویر SEM نگهدارنده فلزی برای آنالیز عنصری EDS از نقاط مشخص شده با علامت +

جدول ۳ آنالیز شیمیایی (EDS) از نقاط مختلف مشخص شده در شکل ۱۰

Label	O (wt. %)	Al (wt. %)	Si (wt. %)	Fe (wt. %)	Total
Spectrum 30	0.45	0.05	0.04	99.45	100.00
Spectrum 31	0.65	0.08	0.02	99.25	100.00
Spectrum 32	0.59	0.07	0.05	99.28	100.00
Spectrum 33	1.04	0.14	0.08	98.74	100.00
Spectrum 34	0.74	0.17	0.05	99.04	100.00
Spectrum 35	0.81	0.11	0.06	99.02	100.00
Spectrum 36	0.80	0.07	0.07	99.07	100.00
Spectrum 37	0.47	0.10	0.02	99.41	100.00
Spectrum 38	0.62	0.07	0.06	99.25	100.00

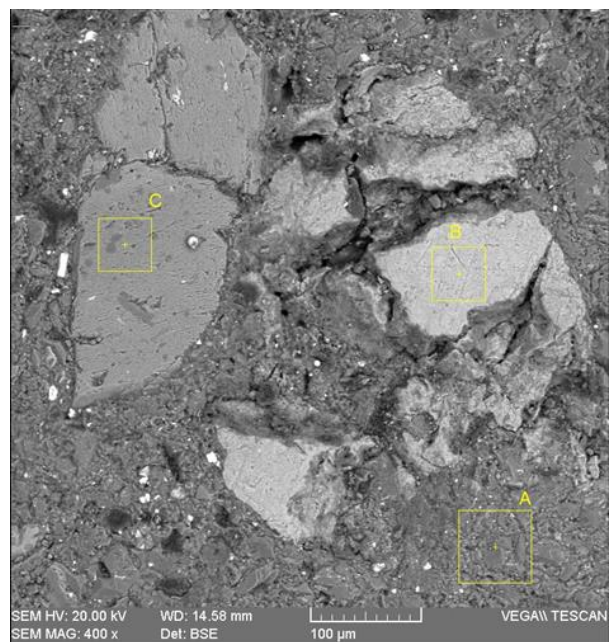
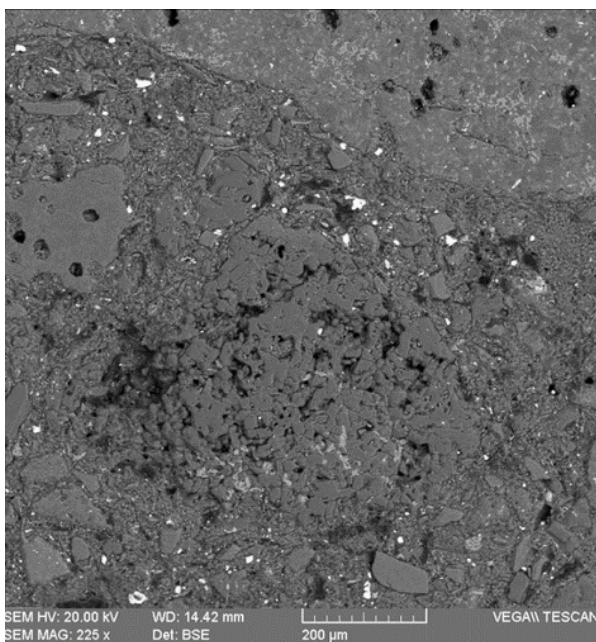


شکل ۱۱ طیف EDS منطقه مشخص شده با شماره ۳۴ در شکل ۱۰

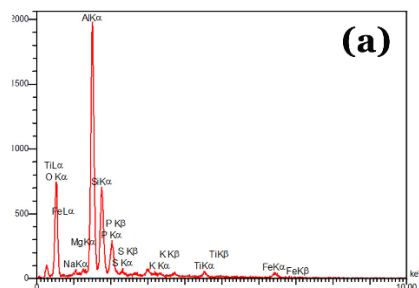
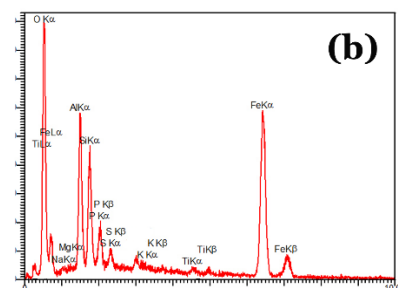
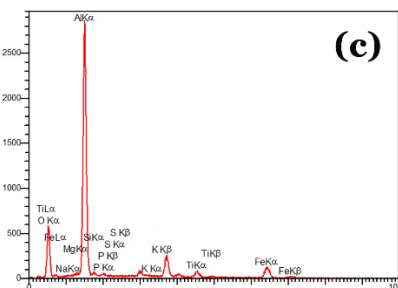
تصاویر میکروسکوپی متعددی از نمونه جرم نسوز تهیه شد. برخلاف ریزساختار نگهدارنده فلزی که در سراسر نمونه یکنواخت بود، تصاویر به‌دست‌آمده از جرم نسوز به دلیل ماهیت پیچیده فرمولاسیونی آن، در نقاط مختلف تفاوت‌هایی نشان داد. شکل ۱۲، تصاویر SEM-BSE از دو نقطه متفاوت از نمونه جرم را در دو بزرگنمایی $225\times$ و $400\times$ نمایش می‌دهد. در این تصاویر، کانتراست بیانگر اختلاف در میانگین وزن مولی فازهاست؛ به‌گونه‌ای که هرچه عدد اتمی عناصر سازنده یک فاز بیشتر باشد، آن فاز روشن‌تر دیده می‌شود.

ریزساختارهای مشاهده‌شده در شکل ۱۲ نشان می‌دهند که دانه‌بندی جرم نسوز بسیار متنوع است؛ به‌طوری‌که ذراتی با اندازه نسبتاً درشت، در حدود ۱۰۰ میکرون (معادل ۰/۱ میلی‌متر)، در کنار دانه‌های بسیار ریز در حد چند میکرون وجود دارند. از سه ناحیه مشخص‌شده با حروف A، B و C آنالیز EDS انجام گرفت که گراف‌های مربوط به آن در شکل ۱۳ آمده است. نتایج آنالیز شیمیایی اکسیدی این نقاط نیز در جدول ۴ ارائه شده است.

این تصاویر میکروسکوپی نه‌تنها اطلاعات ارزشمندی درباره توزیع اندازه دانه‌ها در جرم نسوز فراهم می‌آورند، بلکه یافته‌های به‌دست‌آمده از آنالیزهای فازی و شیمیایی پیشین را نیز تا حد زیادی تأیید می‌کنند. برای درک بهتر نحوه پراکندگی فازها در نمونه، تصویری در بزرگنمایی $2000\times$ تهیه شد که در آن نقشه‌های عنصری (Map) از عناصر اکسیژن، آلومینیوم، سیلیسیم، تیتانیوم، آهن و فسفر ثبت گردید. این تصاویر که در شکل ۱۴ ارائه شده‌اند، به‌وضوح محل قرارگیری هر یک از عناصر تشکیل‌دهنده فازها را نشان می‌دهند.



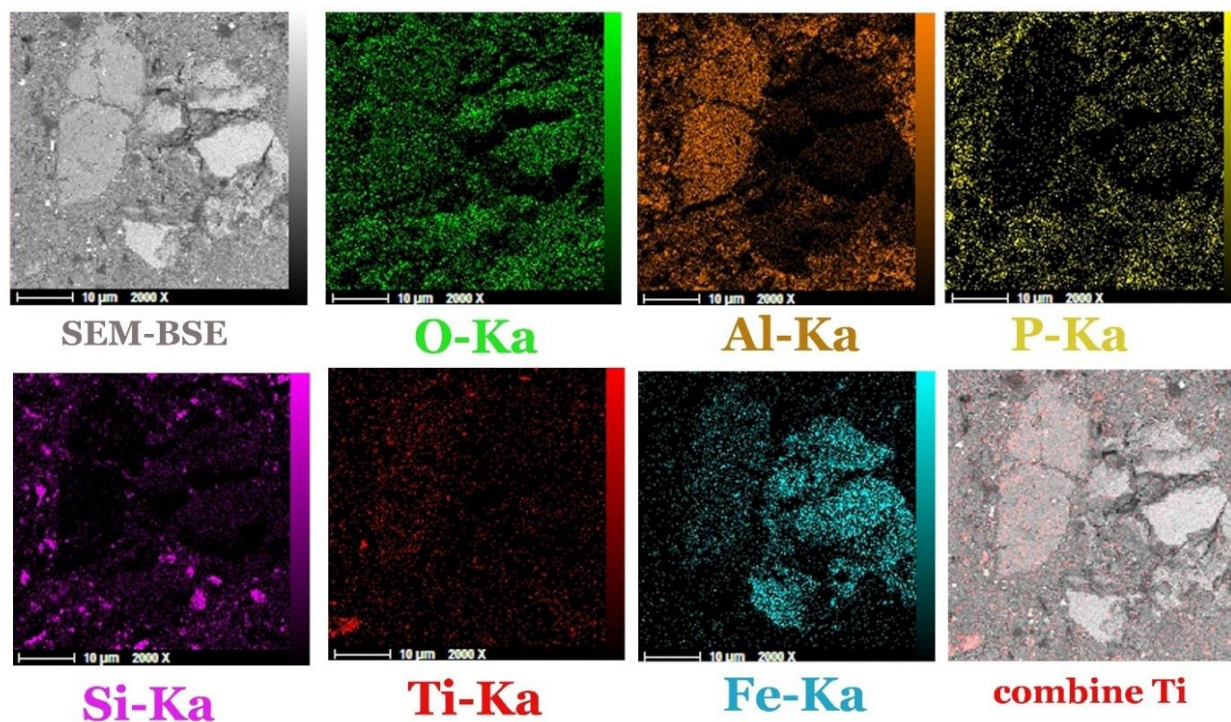
شکل ۱۲ تصاویر SEM-BSE با بزرگنمایی‌های مختلف از نقاط مختلف نمونه جرم نسوز



شکل ۱۳ نمودار آنالیز EDS از نقاط مشخص‌شده A، B و C در شکل ۱۲

جدول ۴ نتایج آنالیز شیمیایی EDS (بر حسب درصد وزنی) مناطق مشخص شده A، B و C در شکل ۱۲

Area	Al ₂ O ₃ (wt. %)	SiO ₂ (wt. %)	TiO ₂ (wt. %)	Fe ₂ O ₃ (wt. %)	P ₂ O ₅ (wt. %)	Total
A	49.0	25.2	1.3	2.4	22.1	100.0
B	20.7	15.7	0.4	51.6	11.6	100.0
C	86.6	0.3	3.0	9.9	0.2	100.0



شکل ۱۴ تصویر SEM به همراه map عناصر اکسیژن، آلومینیوم، سیلیسیم، تیتانیوم، آهن و فسفر مربوط به نمونه جرم نسوز

یک ناحیه دیگر از جرم نسوز انتخاب و از دو نقطه آن آنالیز EDS انجام شد؛ این دو نقطه که با شماره‌های ۲ و ۳ مشخص شده‌اند در شکل ۱۵ و در بزرگنمایی $1260\times$ نشان داده شده‌اند. نتایج آنالیز عنصری این نقاط بر حسب درصد اتمی در جدول ۵ گزارش شده است. دلیل گزارش درصد اتمی در اینجا (به جای گزارش درصد اکسیدی مانند بخش‌های قبل) آن است که خود تکنیک EDS و حتی XRF، عنصر را تشخیص می‌دهند نه فرم اکسیدی آن را؛ تبدیل از حالت عنصری به حالت اکسیدی صرفاً از طریق ملاحظات استوکیومتری با کمک نرم‌افزار انجام می‌گیرد. از آنجایی که آنالیز این دو نقطه به ترکیب فازی‌های محتمل نزدیک است، تنها درصد اتمی گزارش شده‌اند.

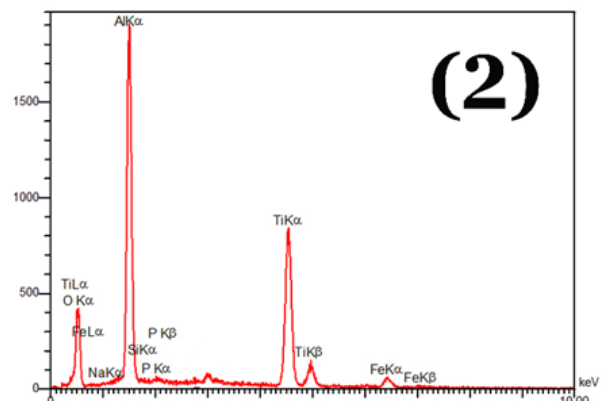
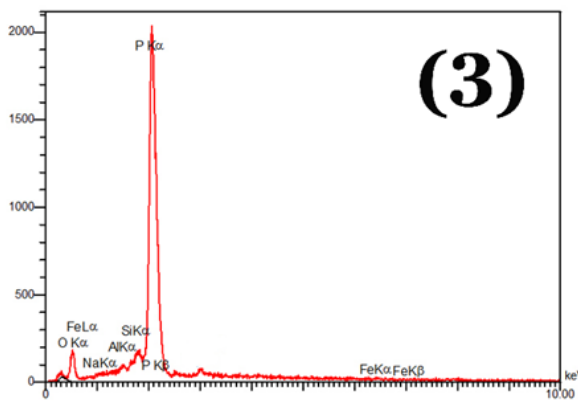
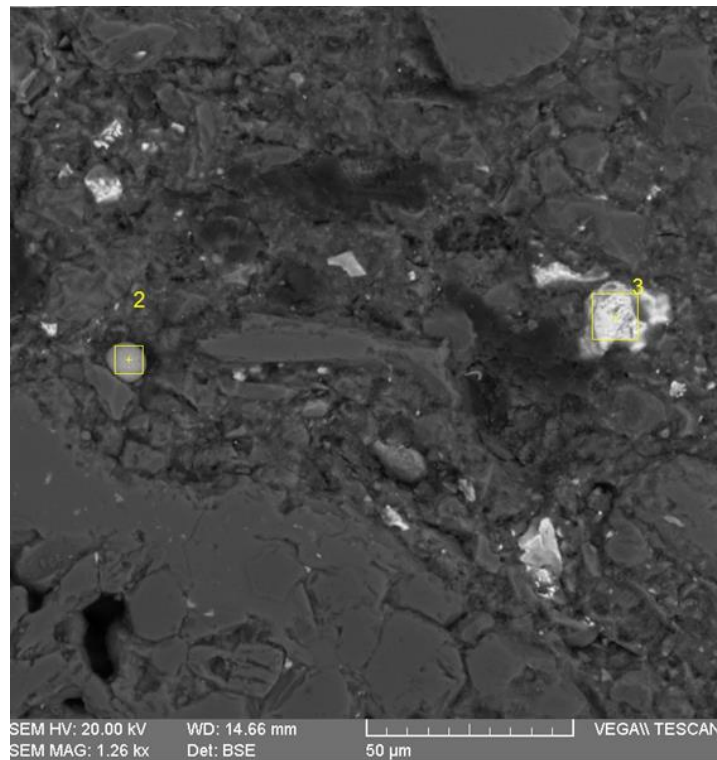
نقطه شماره ۲ نشان‌دهنده فازی است که از نظر استوکیومتری بسیار نزدیک به فاز تیتانات آلومینیوم یا تیالیت، با فرمول Al_2TiO_5 یا $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ می‌باشد [۵]. نقطه شماره ۳ عملاً یک ترکیب فسفردار تقریباً خالص را نشان می‌دهد؛ با در نظر گرفتن درصد اتمی اکسیژن و کنار گذاشتن اتم‌های نامرتب (که سهم بسیار کمی دارند و گرد کردن درصدها قابل قبول است)، درصد اتمی فسفر در این ناحیه تقریباً ۴۴٪ و درصد اتمی اکسیژن حدود ۵۶٪ برآورد می‌شود. برای تسهیل تفسیر، درصدهای اتمی عناصر سازنده فازهای تیالیت و همچنین ترکیبات فسفری مانند P_2O_5 و P_4O_6 در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

عموماً از اسید فسفریک به عنوان منبع تأمین‌کننده فسفر در جرم‌های باند فسفاتی استفاده می‌شود. این نوع جرم‌ها معمولاً در دمایی در حدود $30^\circ C$ تمپر یا کیور می‌شوند که در نتیجه آن، طی یک سری واکنش‌های دی‌هیدراته شدن (از دست دادن آب) به ترکیباتی بر پایه اکسید فسفر با ساختارهای متفاوت نظیر اورتوفسفات‌ها، پیروفسفات‌ها و متافسفات‌ها با بنیان‌های به ترتیب PO_4^{3-} ، $P_2O_4^{4-}$ و PO_3^- تبدیل می‌شوند. درصد اتمی فسفر در این بنیان‌ها به ترتیب برابر ۲۰٪، ۲۲٫۲٪ و ۲۵٪ گزارش شده است. یک واکنش محتمل تولید متافسفات را می‌توان به عنوان معادله ۵ در نظر گرفت [۶].



اگرچه درصد اتمی فسفر در نقطه ۳ برابر با ۴۲٪ بر اساس آنالیز EDS در شکل ۱۵ با مقادیر تئوری فوق تطابق ندارد، نکته مهم این است که وجود مقدار قابل توجه فسفر در این جرم نسوز به روشنی اثبات شده است. منشأ دقیق این فسفر (منبع اولیه ماده) و نیز جزئیات عملیات حرارتی و دمای به کاررفته همچنان نامشخص است و برای روشن‌سازی این موارد به پژوهش‌های تکمیلی در قالب مهندسی معکوس این بخش از قطعه نیاز است.

در مورد این که آیا فاز تیالیت به صورت سنتزی به فرمولاسیون افزوده شده یا در خلال فرایند حرارت‌دهی پودرهای تشکیل‌دهنده جرم نسوز به صورت درجا از واکنش آلومینا با اکسید تیتانیم طبق معادله ۶ پدید آمده است، در حال حاضر نمی‌توان با قطعیت اظهار نظر کرد. با این حال، همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، چنان‌چه این واکنش در محل رخ داده باشد، مواد لازم برای انجام آن در سیستم فراهم است؛ زیرا اکسید تیتانیم یکی از ناخالصی‌های شایع در بسیاری از مواد رسی است و هم‌زمان آلومینای آزاد نیز در این جرم به وفور وجود دارد. بنابراین از نظر دسترسی به واکنش‌دهنده‌ها، وقوع واکنش درجا محتمل است [۷].

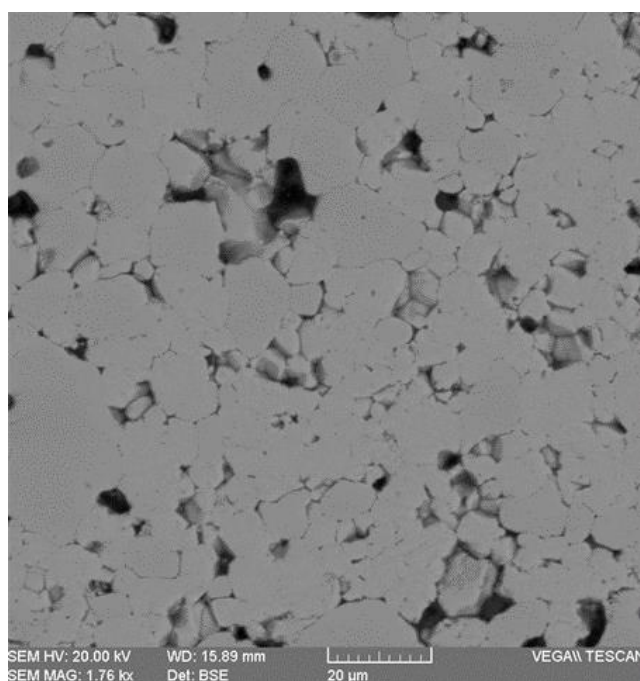


شکل ۱۵ تصویر SEM از جرم نسوز به همراه نمودار آنالیز EDS نقاط مشخص شده ۲ و ۳

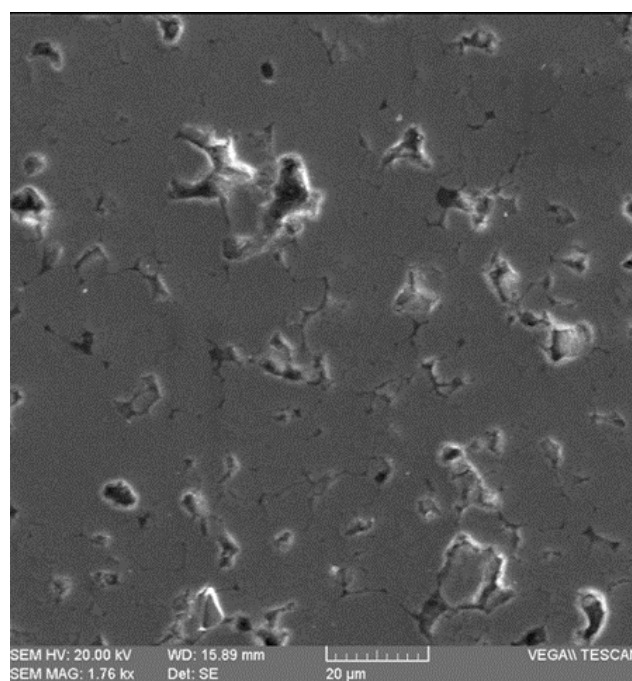
جدول ۵ نتایج آنالیز شیمیایی EDS (بر حسب درصد اتمی) مناطق مشخص شده ۲ و ۳ در شکل ۱۵ به همراه آنالیز عنصری چند فاز (به صورت خالص) با احتمال حضور بالا در این جرم نسوز

Area (Phase)	O (at. %)	Al (at. %)	Si (at. %)	Ti (at. %)	Fe (at. %)	P (at. %)	Total
2	66.2	22.4	0	10.4	1.0	0	100.0
3	54.5	0.5	2.1	0	0	42.9	100.0
(Tialite phase)	62.5	25.0	-	12.5	-	-	100.0
(P ₂ O ₅)	71.4	-	-	-	-	28.6	100.0
(P ₄ O ₆)	60.0	-	-	-	-	40.0	100.0

شکل ۱۶ ریزساختار توپیی نازل تاندیش را نشان می‌دهد که با استفاده از الکترون‌های برگشتی (BSE) و الکترون‌های ثانویه (SE) تصویربرداری شده است. ثبت هم‌زمان تصاویر در دو مد BSE و SE امکان تفکیک آسان‌تر تخلخل‌ها از فازهای ثانویه را فراهم می‌سازد. مشاهده می‌شود که این دو تصویر شباهت زیادی به یکدیگر دارند. همچنین مقایسه آن‌ها نشان می‌دهد که در تصویر حاصل از الکترون‌های برگشتی تغییر رنگ قابل توجهی در دانه‌ها مشاهده نمی‌شود. این موضوع بیانگر آن است که به جز تخلخل‌های موجود، هیچ فاز ثانویه‌ای در ریزساختار حضور ندارد؛ زیرا اختلافی در کانتراست ناشی از تفاوت عدد اتمی ذرات دیده نمی‌شود.



(ب) تصویر الکترون‌های برگشتی (BSE)



(الف) تصویر الکترون‌های ثانویه (SE)

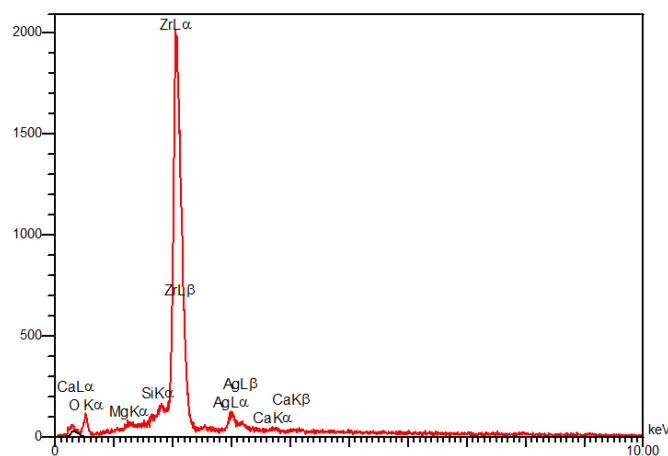
شکل ۱۶ تصویر ریزساختار توپیی نازل تاندیش در بزرگنمایی ۱۷۶۰X از مُدهای تصویرسازی مختلف

علاوه بر این، تصاویر نشان می‌دهند که دانه‌ها به صورت فشرده در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و مرزهای آن‌ها صاف و مشخص نیست، بلکه به صورت درهم‌تنیده شکل گرفته‌اند. وجود تخلخل‌های نسبتاً زیاد نیز در تصویر مشهود است. یکی از دلایل این امر سختی بالای زیرکونیا است؛ به طوری که برخی از ذرات آن در طی فرایند پولیش به جای ساییده شدن از سطح نمونه جدا می‌شوند. دلیل دیگر به شرایط زینتر نمونه برمی‌گردد که اجازه دستیابی به چگالی‌های بالا و حذف تخلخل‌ها را به نمونه نداده است. با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، متوسط اندازه دانه‌ها در این ریزساختار در محدوده $4.9 \pm 9.3 \mu\text{m}$ و درصد تخلخل ریزساختار در محدوده ۹.۵ – ۸.۵٪ اندازه‌گیری شد. اگرچه دانه‌ها رشد افراطی نشان نمی‌دهند، اما طیف وسیعی از اندازه‌ها را در بر می‌گیرند؛ از چند میکرون تا چند ده میکرون. این موضوع نشان می‌دهد که ذرات پودر اولیه تک‌سایز نبوده و به احتمال زیاد برای دستیابی به فشرده‌گی بهتر، دارای توزیع دانه‌بندی گسترده‌تری بوده‌اند.

شکل ۱۷ آنالیز نقطه‌ای را از ناحیه‌ای متراکم در نمونه، دور از مرزخانه‌ها، نشان می‌دهد. نتایج این آنالیز عنصری در جدول ۶ ارائه شده است. همچنین برای مقایسه، آنالیز مربوط به زیرکونیای خالص نیز درج گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون EDS روی نمونه توپی نازل تاندیش، تطابق بسیار خوبی با مقادیر تئوری درصد اتمی عناصر تشکیل‌دهنده فاز زیرکونیا دارد. بنابراین، در تأیید نتایجی که تاکنون از آنالیزهای عنصری و فازی در ابعاد میکروسکوپی از نمونه توپی نازل گرفته شده است، نتیجه آنالیز میکروسکوپی SEM نیز وجود تک فاز زیرکونیا (ZrO_2) را در توپی نازل تاندیش اثبات می‌کند.

مقدار اندکی کلسیم نیز در آنالیز مشاهده شد که همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، به‌منظور پایدارسازی زیرکونیا به ترکیب اضافه شده است. در بررسی‌های قبلی همچنین مشخص شده بود که منیزیا نیز برای پایدارسازی مورد استفاده قرار گرفته است؛ با وجود این‌که بر اساس نتایج آنالیز عنصری جدول ۲، درصد منیزیا در فرمولاسیون توپی نازل بالاتر از اکسید کلسیم است (۱/۴٪ در مقابل ۰/۰۶۶٪)، اما توسط EDS شناسایی نشده است.

با فرض صحت سایر آزمایش‌ها و وجود قطعی منیزیا در ترکیب، می‌توان این موضوع را به ویژگی‌های ذاتی عنصر منیزیم نسبت داد. از یک سو، منیزیم به دلیل عدد اتمی پایین‌تر نسبت به کلسیم، پرتوهای ایکس با انرژی کمتری تولید می‌کند که احتمال عبور آن‌ها از درون ماده کمتر است. از سوی دیگر، از آنجا که محیط اطراف منیزیم در توپی نازل به شدت غنی از زیرکونیا است، عنصر زیرکونیم با عدد اتمی بالا ($Z=40$) می‌تواند به‌عنوان جاذب پرتوهای ایکس کم‌انرژی منتشرشده از منیزیم عمل کند. این امر منطقی است زیرا توانایی جذب پرتوها با توان سوم عدد اتمی عنصر متناسب است و بنابراین زیرکونیم به‌طور ویژه‌ای در جذب پرتوهای با طول موج بلند (انرژی پایین) مؤثر است. در طیف آنالیز شکل ۱۷، همچنین مشاهده می‌شود که دو پیک $Ag-L\alpha$ و $Ag-L\beta$ نیز حضور دارند. این دو پیک به دلیل پوشش‌دهی سطح نمونه‌های سرامیکی با پوشش نقره در طیف ظاهر شده‌اند و ارتباطی با عناصر تشکیل‌دهنده توپی نازل ندارند. یادآوری می‌شود در تمام طیف‌های آنالیز قبلی نیز چنین پیکی وجود داشت اما به دلیل اینکه ارتباطی با موضوع پژوهش نداشت، برچسب نخورده بود.



شکل ۱۷ آنالیز EDS از نقطه X در شکل ۱۶-ب

جدول ۶ نتیجه آنالیز شیمیایی EDS (بر حسب درصد اتمی) از نقطه مشخص شده با علامت X در شکل ۱۶-ب به همراه آنالیز عنصری فاز زیرکونیای خالص

Point	O (at. %)	Zr (at. %)	Ca (at. %)	Total
X	67.5	32.4	0.1	100.0
Pure ZrO_2	66.7	33.3	—	100.0

۳-۳- اندازه‌گیری چگالی

چگالی بالک، چگالی ظاهری، درصد جذب آب و درصد تخلخل ظاهری هر سه بخش نازل تاندیش شامل نگهدارنده فلزی، جرم نسوز و توپی نازل با استفاده از روش سه وزنی و غوطه‌وری ارشمیدس - مطابق توضیحات ارائه‌شده در بخش دوم - اندازه‌گیری و محاسبه

گردید. برای انجام این آزمایش، در مورد نگهدارنده فلزی ابتدا بخشی از آن با قیچی فلزبر از قطعه اصلی جدا شد. در مورد جرم نسوز نیز قطعه‌ای برش داده و جدا گردید؛ اما برای توپی نازل، از یک توپی کامل و سالم که از درون جرم نسوز استخراج شده بود، به‌طور مستقیم استفاده شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری چگالی و سایر پارامترهای مرتبط در جدول ۷ گزارش شده است.

جدول ۷ نتیجه اندازه‌گیری چگالی بالک، چگالی ظاهری، درصد جذب آب و درصد تخلخل ظاهری بخش‌های مختلف نازل تاندیش

پارامترهای چگالی	اجزای نازل تاندیش		
	نگهدارنده فلزی	جرم نسوز	توپی نازل
چگالی بالک (B.D) [g/cm ³]	7.68	2.84	5.41
چگالی ظاهری (A.S.G) [g/cm ³]	7.98	3.26	5.45
درصد جذب آب (W.A) [%]	0.5	4.5	0.1
درصد تخلخل باز (A.P) [%]	3.7	12.8	0.8

چگالی بالک نگهدارنده فلزی به چگالی فاز فریت (7.87 g/cm^3) نزدیک است. این که یکی از نمونه‌های ورق فلزی مورد بررسی دارای درصد تخلخل باز معادل ۳.۷٪ است، نشان می‌دهد که این ماده دارای میزان قابل توجهی تخلخل سطحی است. چنین موضوعی باید در انتخاب متریال برای ساخت نگهدارنده فلزی مدنظر قرار گیرد؛ زیرا وجود این تخلخل‌ها می‌تواند با جذب رطوبت هوا، موجب خوردگی سطح ورق فولادی نگهدارنده نازل پیش از استفاده و در زمان نگهداری در انبار شود. در واقع، یکی از نازل‌هایی که برای مهندسی معکوس در اختیار قرار گرفت، دقیقاً با همین مشکل مواجه بود.

در مورد چگالی جرم نسوز، با توجه به چندفازی بودن ترکیب آن، تعیین چگالی واقعی امکان‌پذیر نیست. با این حال، مقادیر نسبتاً بالای درصد جذب آب و درصد تخلخل ظاهری نشان می‌دهد که این جرم دارای فضای خالی زیادی در ساختار خود است؛ ویژگی‌ای که آن را برای عایق کاری حرارتی بسیار مناسب می‌سازد. این قابلیت نیز با نقش جرم نسوز به‌عنوان نگهدارنده و نشیمنگاه توپی نازل همخوانی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در بخش جرم نسوز نازل تاندیش، دستیابی به چگالی بالا هرگز هدف اصلی سازندگان نبوده است.

چگالی زیرکونیای مونوکلینیک 5.78 g/cm^3 و چگالی زیرکونیای تتراگونال 6.04 g/cm^3 می‌باشد. اگر فرض کنیم این دو فاز به‌طور مساوی در توپی نازل وجود دارند، چگالی میانگین توپی باید در حدود 5.91 g/cm^3 باشد. این عدد نشان می‌دهد که چگالی نسبی توپی نازل تنها ۹۱.۵٪ چگالی تئوری است؛ مقداری که برای سرامیک زیرکونیا نسبتاً پایین به‌شمار می‌آید. با توجه به درصد جذب آب ناچیز و درصد تخلخل باز کمتر از ۱٪ که برای این نازل اندازه‌گیری شد، می‌توان نتیجه گرفت که توپی زیرکونیایی حاوی مقدار زیادی تخلخل بسته است. این نتیجه چندان دور از انتظار نیست، چرا که در تصاویر میکروسکوپی ریزساختار (شکل ۱۶) نیز وجود تخلخل‌های نسبتاً زیاد مشاهده شد.

درخصوص دلیل پایین بودن چگالی توپی زیرکونیایی، دو احتمال مطرح می‌شود. احتمال نخست مبتنی بر این اصل شناخته‌شده است که ایجاد درصد کنترل‌شده‌ای از تخلخل در دیرگذاها می‌تواند به بهبود مقاومت آن‌ها در برابر شوک حرارتی کمک کند. چنین تخلخل‌هایی به‌عنوان موانعی در برابر انتشار ترک عمل کرده و با جذب انرژی شکست، سرعت رشد و گسترش ترک‌ها را کاهش می‌دهند. از این رو، حضور تخلخل‌ها تا جایی که استحکام کلی قطعه را به‌طور جدی تضعیف نکند، قابل پذیرش است. احتمال دوم آن است که شرایط زینتر به‌درستی اعمال نشده است؛ به‌عنوان مثال، دمای زینتر پایین بوده یا از کمک‌زینترهای مناسب استفاده نشده است و در نتیجه، تراکم کافی در دماهای پایین‌تر حاصل نشده است.

با این حال، نباید فراموش کرد که چنین قطعاتی مصرفی بوده و اساساً برای طول عمر بالا طراحی نمی‌شوند. طول عمر همین نمونه‌ای که در این پژوهش بررسی شد، در بهترین حالت تنها حدود دو ساعت در کارخانه فولاد کاوه جنوب کیش گزارش شده است. البته احتمال نخست (یعنی تعمد در ایجاد تخلخل) با این چالش روبه‌روست که عملکرد توپی نازل زیرکونیایی به دلیل تماس مستقیم با جریان بسیار شدید مذاب، نمی‌تواند با سایر محصولات دیرگداز نظیر آجرهای نسوز مورد استفاده در کوره‌های عملیات حرارتی، پخت سرامیک یا حتی نسوزهای به‌کاررفته در پاتیل‌های فولادسازی - که معمولاً با چنین جریان شدیدی از مذاب مواجه نیستند - مقایسه

شود. در آجرهای نسوز، شوک حرارتی مهم‌ترین مکانیزم شکست است و به همین دلیل، کنترل تخلخل می‌تواند به بهبود مقاومت آن‌ها کمک کند. اما بر اساس پژوهش‌های اخیر [۸]، اصلی‌ترین مکانیزم شکست در توپ‌های زیرکونیایی نازل از نفوذ اولیه مذاب فولاد به درون توپی آغاز می‌شود و سپس مکانیزم‌های دیگر فعال می‌شوند. بنابراین، هرچه ریزساختار توپی متخلخل‌تر باشد، نفوذ مذاب سریع‌تر اتفاق افتاده و خوردگی تشدید خواهد شد.

به این ترتیب، آزمون ساده و کم‌هزینه‌ای مانند اندازه‌گیری چگالی و درصد تخلخل نشان می‌دهد که توپی زیرکونیایی نازل، با وجود ظاهر متراکم، درون خود دارای تخلخل‌های بسته متعددی است. این تخلخل‌ها در هنگام عبور مذاب، مسیر نفوذ را تسهیل کرده و به‌عنوان عاملی برای تسریع خوردگی و کاهش شدید عمر قطعه عمل می‌کنند. در نتیجه، خرید این نازل‌ها به‌صورت عمده و با در نظر گرفتن ماهیت مصرفی و عمر کوتاه آن‌ها، از نظر اقتصادی قابل توجیه خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک نمونه نازل تاندیش وارداتی به‌طور دقیق بررسی شد تا با شناخت کامل اجزای سازنده، مسیر دستیابی به دانش فنی تولید داخلی این قطعه هموار گردد. نتایج به‌روشنی اهمیت مهندسی معکوس در بهبود فرایند تولید و کیفیت محصولات صنعتی-به‌ویژه قطعات وارداتی-را نشان می‌دهد. از این بررسی، نتایج زیر حاصل شد:

- جنس بدنه فلزی نگهدارنده نازل از فولاد ساده کربنی است. آنالیزهای عنصری و ریزساختاری، حضور عناصر آلیاژی خاص را نشان ندادند. برای ساخت این بخش، می‌توان از ورق فولادی با گرید مناسب استفاده و با فرایند پرس‌کاری و قالب مخصوص، قطعه را شکل داد. بنابراین گلوگاه تولید این بخش عملاً ساخت قالب پرس و اجرای پرس‌کاری اختصاصی است و در صورت تولید انبوه، ساخت قالب اقتصادی خواهد بود.

- جرم نسوز به‌کار رفته در این نازل از نوع جرم‌های باند فسفاتی است؛ اگرچه باید در دماهای بسیار بالا پایدار بماند، اما تحت تنش مکانیکی یا حرارتی شدید قرار ندارد و عمدتاً نقش نگهدارنده و نشیمنگاه توپی نازل را ایفا می‌کند. برای تهیه این جرم می‌توان از مواد اولیه‌ای مانند کائولن/بال‌کلی، سیلیس و آلومینا با توزیع دانه‌بندی مختلف استفاده نمود. بررسی‌های انجام‌شده با تولیدکنندگان داخلی نشان داد که تولید این جرم در ایران از نظر فنی ممکن است اما در تناژ پایین از نظر اقتصادی برای کارخانه توجیه‌پذیر نیست. بنابراین گلوگاه تولید در این بخش نخست دستیابی به فرمولاسیون مناسب مواد اولیه برای رسیدن به آنالیز فازی مطلوب است و سپس یافتن راهکارهایی برای اقتصادی‌سازی تولید در مقیاس‌های کوچک‌تر. لازم به یادآوری است که نقش اصلی جرم نسوز، تأمین نشیمنگاهی مقاوم به دما برای توپی نازل است.

- جنس توپی نازل از زیرکونیای پایدار شده با کلسیا و منیزیا تعیین شد. همچنین، مشخص شد که در ساخت این توپی، از زیرکونیای خالص نیمه پایدارشده و نه از زیرکون (سیلیکات زیرکونیم) استفاده شده است. توضیح آنکه در ثبت اختراعی که در این زمینه در سال ۱۳۹۹ در ایران انجام شده است (و در قسمت مقدمه نیز به آن اشاره شد)، از سیلیکات زیرکونیم ($ZrSiO_4$) برای ساخت توپی نازل استفاده شده است. گلوگاه اصلی ساخت این بخش از نازل تاندیش بیشتر به دانش فنی تولید آن بازمی‌گردد. به دلیل شکل پیچیده این قطعه، امکان شکل‌دهی آن با روش‌های پرس متعارف وجود ندارد و تولید آن باید از طریق روش‌های جایگزین نظیر پرس گل، پرس ایزواستاتیک یا ریخته‌گری دوغابی انجام گیرد؛ همچنین، با توجه به اینکه توپی نازل در نهایت در دمایی در حدود ۱۶۴۰ درجه سانتی‌گراد که دمای عمومی فولاد مذاب است استفاده شود بنابراین، حداقل دمای زینتر توپی نازل نیز قاعدتاً نباید کمتر از ۱۶۴۰ درجه سانتی‌گراد باشد. موضوع پخت و لزوم در اختیار داشتن کوره‌ای با دمای مناسب، می‌تواند چالش‌هایی جدی برای تولید پایدار این قطعه ایجاد کند.

به‌عنوان جمع‌بندی پایانی می‌توان گفت که امکان تولید صنعتی نازل تاندیش در ایران وجود دارد، اما در میان سه بخش اصلی این قطعه، ساخت توپی نازل دشواری‌های فنی بیشتری به همراه خواهد داشت. بنابراین، هرگونه تلاش برای بومی‌سازی تولید نازل تاندیش باید با راهکاری برای دستیابی به دانش فنی ساخت توپی زیرکونیایی همراه باشد؛ توپی‌ای که نیازمند استفاده از زیرکونیای با خلوص بالا و فرایند زینتر در دماهای بالا است تا قطعه‌ای با دوام و طول عمر مناسب برای مصرف‌کنندگان فراهم گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از همکاری صمیمانه آقایان مهندس رضا دهستانی اردکانی (ترسیم نقشه سالی‌دورکس قطعه)، میثم شریفی (اندازه‌گیری چگالی نمونه‌ها) و امیرحسین آقایی میبیدی (مشارکت در انجام آنالیزهای ریزساختاری) در طول انجام این پژوهش قدردانی می‌نماید. به پاس قدردانی از تلاش‌های خستگی‌ناپذیر زنده‌یاد آقای دکتر ابوالحسن نجفی در پژوهش در حوزه مواد دیرگداز در ایران و به ویژه در دهه ۸۰ شمسی، این مقاله به روح والای ایشان پیشکش می‌شود.

References

- [1] World Steel Association. [Internet]. 2025 [cited 2025 Apr 15]. Available from: <https://www.worldsteel.org>
- [2] Louhenkilpi S. Continuous casting of steel. In: *Treatise on process metallurgy 2024* Jan 1 (pp. 343-383). Elsevier.
- [3] Hemberger Y, Berthold C, Nickel KG. Wetting and corrosion of yttria stabilized zirconia by molten slags. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012 Aug 1;32(11):2859-66. doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2011.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.12.005)
- [4] Wiśniewska K, Madej D, Szczerba J. Corrosion of the refractory zirconia metering nozzle due to molten steel and slag. *Materiali in tehnologije*. 2016;50(1):29-32. doi: [10.17222/mit.2014.188](https://doi.org/10.17222/mit.2014.188)
- [5] Hojjati A, Naghizadeh R, Sedaghat A, Majidian H. Investigation of the effect of the titania and tialite on the physical and microstructural properties of cordierite synthesized by solid state method [master's thesis]. Tehran: Iran University of Science and Technology; 2024. [In Persian]
- [6] Ansari MJ. Manufacture and comparison of mechanical properties of reinforced polypropylene nanocomposite with carbon fibers and calcium carbonate nanoparticles. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 Oct 23;6(5):1-2. [In Persian]
- [7] Najafi A, Sarpoolaky H, Golestani-Fard F. Effects of titanium oxide addition on the properties of alumina spinel refractory castables. In: Smith J, editor. *Proceedings of the UNITECR '05: 9th Biennial Worldwide Congress on Refractories*; 2005 Nov 8-11; Orlando, Florida. Westerville (OH): The American Ceramic Society; 2005. p. 138-40.
- [8] Nuradini-Zarkani MJ, Barzegar-Bafrooei H, Feizpour M. Investigation of corrosion in tundish nozzles of open systems in steel continuous casting [master's thesis]. Meybod (Yazd): Meybod University; 2025. [In Persian]