

# تأثیر اکسیدهای اسیدی و قلیایی سرباره بر ترکیبات نسوزهای اسپینلی منیزیتی - کرومیتی در کوره آند ذوب مس

مصطفی صالحی رضاآبادی<sup>۱\*</sup>، احمد منشی<sup>۲</sup>، مجید جعفری<sup>۳</sup>، محمد رضا منشی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

\*Mostafasalehi90@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۵/۰۱، تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۵/۲۰)

## چکیده

از نسوزهای  $MgO - Cr_2O_3$  در کوره‌های تصفیه حرارتی ذوب مس استفاده می‌شود. این نسوزهای قلیایی در تماس با اکسیدهای اسیدی و قلیایی سرباره و در دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به شدت توسط سرباره مذاب تحت تأثیر قرار می‌گیرند، به نحوی که لایه پر دانسته سرباره در داخل دانه‌های اسپینل و پریکلاس نسوز به شدت قابل مشاهده است. در نسوزهای منیزیتی - کرومیتی نفوذ  $SiO_2$ ،  $Cu_2O$  و اکسیدهای آهن باعث رشد اسپینل کرومیت - منیزیت  $(Fe, Mg)(Cr, Al, Fe)_2O_4$  و تشکیل فاز فریت منیزیم  $Fe_2MgO_4$  می‌شوند، به نحوی که دمای نسوزندگی مناطقی که تحت نفوذ قرار گرفته‌اند از ۱۹۰۰ به ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد و ساختار باند جامد نسوز به ساختار باند مایع تبدیل می‌شود. نتایج مطالعاتی ریز ساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز فازی با پراش اشعه ایکس (XRD) نشان داد که در مواد نسوز مورد آزمایش، تشکیل فاز سیلیکاتی زود ذوب  $Fe_2SiO_4$  و فاز قلیایی فریت منیزیم به عنوان عوامل خوردگی شیمیایی شناخته شده‌اند، و بر اساس نتایج بدست آمده نسوزهایی که از فشردگی مولکولی بالاتری برخوردار باشند کمتر تحت نفوذ فازهای اکسیدی قلیایی و اسیدی سرباره قرار می‌گیرند.

## واژه‌های کلیدی:

آجر منیزیت کرومیتی، کوره آند، سرباره مس، پریکلاس، اسپینل، خوردگی شیمیایی

## ۱- مقدمه

خواص مورد نظر را می‌توان تامین کرد و هم‌چنین محفظه‌ای برای تصفیه نهایی مس مذاب و کاهش آخال‌های آن قبل از ورود به قالب ریخته‌گری مورد توجه قرار گرفته است. دیرگدازهای به کار رفته در جداره نسوز شامل سه لایه دیرگداز

صنعت مس با مصرف قسمت عمده‌ای از مواد دیر گداز، جزء مهم‌ترین مصرف کنندگان این محصولات می‌باشد. کوره آند یکی از واحدهای مصرف کننده دیرگدازها در صنایع مس می‌باشد. امروزه کوره آند به عنوان آخرین مرحله‌ای که در آن

اکسید مس بخشی از لایه سرباره می‌باشد [۲]. سرباره، حاوی اکسیدهای مس، اکسیدهای آهن، سیلیس به همراه مقدار کمی اکسیدهای ناخالصی است.

جدول (۱): آنالیز اکسیدی سرباره کوره آند

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaO	MgO
۲۲/۳۶	۱۸/۸	۱۵/۶۲	۱۳/۰۶	۰/۲۴	۰/۲۹

نسوزهای قلیایی منیزیته \_ کرومیتی بیشترین مقاومت به خوردگی شیمیایی را در مقابل سرباره دارند. دو نوع نسوز بر اساس احتیاجات، منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد، هدف از انتخاب این آجرها افزایش عمر کاری جداره نسوز کوره می‌باشد.

نسوز نوع اول به روش باند مستقیم تولید می‌شود، که ذرات منیزیت و کرومیت را در دمای ۱۷۰۰-۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌دهند. بر اساس آزمایشات مشخص شد که محصول نهایی شامل اسپینل کرومیت (Mg,Fe)(Cr,Al,Fe)<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، پریکلاس (MgO) و مقدار کمی ترکیبات دیگر می‌باشد.

نسوز نوع دوم به روش باند مجدد تولید می‌شود، که دانه‌های منیزیت و کرومیت در دمای ۲۱۰۰ درجه سانتی‌گراد زینتر می‌شوند، و پس از پخت اولیه محصول را خرد و آسیاب می‌کنند، و با کانه کرومیت در دمای پایین تری برای بار دوم حرارت می‌دهند. ترکیب نهایی شامل دانه‌های منیزیت کرومیت پیش زینتر شده، پریکلاس، اسپینل کرومیت و مقدار کمی ترکیبات دیگر می‌باشد [۳].

از مخلوط کردن منیزیت و کرومیت در نسوزهای باند مستقیم می‌توان به درصد‌های تعریف شده‌ای از SiO<sub>2</sub> و Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> رسید، زمانی که این ترکیب خرد و در دمای ۱۷۰۰-۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد زینتر می‌شود، در ساختار دانه‌هایی بر پایه اسپینل (Mg,Fe)(Cr,Al,Fe)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> که توسط فازهای متصل به هم سیلیکات‌های شیشه‌ای احاطه شده‌اند، به وجود می‌آید، یکی از مشکلات این نوع نسوز ذوب شدن فازهای سیلیکاتی در دمای

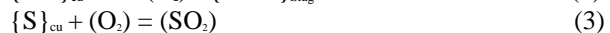
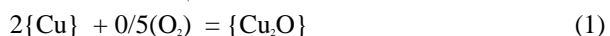
با وظایف متفاوت می‌باشد. در لایه اول که لایه ایمنی نیز نامیده می‌شود از آجرهای شاموتی به منظور محافظت و نگهداری بدنه فولادی کوره در زیر دمای بحرانی آن در طول عملکرد ذوب استفاده می‌گردد. لایه دوم که لایه دائمی نامیده می‌شود از جرم‌های ریختنی آلومینی تشکیل شده است.

در نهایت خارجی ترین لایه در داخل کوره آند لایه مصرفی یا لایه کاری می‌باشد که در حقیقت نوعی دیرگداز منیزیته \_ کرومیتی است. وظیفه اصلی این لایه امکان خارج کردن سرباره و مذاب بدون وارد آمدن آسیب به لایه دائمی و جداره فولادی است. از جمله وظایف دیگر این لایه می‌توان به جلوگیری از تلفات حرارتی، محافظت آجرهای لایه‌های دیگر از آسیب‌های حرارتی و شیمیایی ناشی از تماس مستقیم با سرباره و کاهش میزان ناخالصی‌های اکسیدی اشاره کرد.

لازم به ذکر است که پس از عملیات نسوز کاری کوره آند، جداره نسوز به مدت ۱۰ ساعت برای خشک کردن در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود. هم‌چنین قبل از عملکرد مذاب ریزی، به علت پایین بودن مقاومت به شوک حرارتی آجرهای منیزیته \_ کرومیتی، کوره به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد پیشگرم می‌شود [۱].

پالایش حرارتی مس بلیستر در کوره آند ۲۵۰ تنی انجام می‌شود، در طی مرحله اکسیداسیون و احیا دمای مذاب تا ۱۲۸۰ درجه سانتی‌گراد بالا می‌رود، در مرحله اکسیداسیون ناخالصی‌ها بوسیله تزریق هوای فشرده به درون مذاب تصفیه می‌شود. ناخالصی‌های اصلی مس بلیستر آهن، گوگرد، سیلیس و مقدار کمی عناصر دیگر می‌باشند. از آنجاییکه مس فاز اصلی است ابتدا مس اکسید می‌شود، اکسیدهای تولید شده به سطح مذاب می‌روند و باعث تشکیل لایه پر دانسیته سرباره می‌شوند.

واکنش‌های اصلی سرباره به صورت زیر انجام می‌شوند:



همزمان اکسیژن در مس حل می‌شود:



روش آزمون بوت (Crucible Test) نیز به منظور شبیه سازی آزمایشگاهی اثر سرباره بر نسوز استفاده شده است. در این روش یک سوراخ به قطر ۳۰mm و عمق ۳mm بر روی یک سطح افقی بلوک نسوز به ابعاد  $70 \times 70 \times 65 \text{ mm}^3$  که از آجر خام بریده شده، ایجاد گردید. سپس ۵۰ گرم سرباره داخل سوراخ استوانه‌ای ریخته شده، و در دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت حرارت داده شد، در نهایت با نمونه برداری از آجرهای تست شده، مطالعات فاز شناسی با استفاده از روش پراش پرتو ایکس (XRD) و مطالعات ریز ساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و الکترونی برگشتی (BSE) به منظور مقایسه بهتر رفتار نمونه‌ها انجام گردید [۶].

برای بررسی خواص فیزیکی پس از تخریب کوره آند نمونه‌هایی از نسوزهای خط سرباره تهیه گردید، و با فاصله از سطح داغ میزان تخلخل و دانسیته آجرها محاسبه شد.

### ۳- نتایج و بحث

اطلاعات سینتیک خوردگی دو نوع دیرگداز باند مجدد (S55) و باند مستقیم (P70DL) در جدول (۳) نشان داده شده است، و هم‌چنین منحنی سینتیک خوردگی نسوزهای (S55) و (P70DL) به ترتیب در شکل‌های (الف) و (ب) رسم شده است، در هر دو شکل با گذشت زمان‌های اولیه مقدار حلالیت منیزیت (MgO) سریعاً افزایش یافته است. در شکل (الف) بعد از گذشت زمان ۱۰ ساعت، شیب منحنی حلالیت منیزیت کاهش می‌یابد، که نشان دهنده کاهش سرعت خوردگی نسوز S55 می‌باشد، در واقع خوردگی توسط نفوذ سرباره و تشکیل یک لایه واکنشی مقاوم کنترل می‌شود. اما در شکل (ب) شیب منحنی حلالیت منیزیت (MgO) کاهش نمی‌یابد، و نشان می‌دهد که خوردگی نسوز P70DL دائماً افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در شکل (ب) مقادیر منیزیت (MgO) به دست آمده در زمان‌های یکسان نسبت به شکل (الف) بیشتر می‌باشد. سرباره نفوذ کرده به ساختار نسوز باند مستقیم باعث تشکیل فاز سیلیکات‌های شیشه‌ای زود ذوب به صورت متصل و پیوسته

پایین و محدودیت شدید کاربرد آن می‌باشد. با ساخت آجرهای باند مجدد، فازهای سیلیکاتی به صورت اتصال مستقیم و پیوسته تشکیل نمی‌شوند، و به صورت منفصل و جداگانه شکل می‌گیرند، در نتیجه کمتر بر خواص آجر تاثیر می‌گذارد [۴].

در تحقیق حاضر بررسی مفصلی بر روی دو گروه از آجرهای نسوز منیزیتی - کرومیتی باند مستقیم و باند مجدد جهت شناسایی عوامل خوردگی و تخریب این نوع نسوزها انجام شده است. نسوزهای مورد آزمایش آجر منیزیتی - کرومیتی باند مستقیم ساخت شرکت نسوز پارس یزد با نام تجاری P70DL و آجر باند مجدد ساخت شرکت فایچر اتریش با نام تجاری S55 می‌باشد.

### ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از دو نوع نسوز کاربردی و هم‌چنین سرباره کوره آند جهت اینکه نمونه‌ها به طور کامل با مواد موجود در صنعت تطابق داشته باشند، استفاده شده است. مهم‌ترین هدف این تحقیق شناسایی عوامل تخریب نسوز خط سرباره کوره آند ذوب مس می‌باشد، و از وارد کردن سایر افزودنی‌ها به ترکیب سرباره و نمونه‌های مورد آزمایش خودداری شده است. مشخصات دو نوع نسوز مورد استفاده در جدول (۲) نشان داده شده است. در تحقیق حاضر با توجه به امکانات آزمایشگاهی آزمون استاندارد انگشت (Finger) به صورت آزمایش خوردگی استاتیک انجام شد. در آزمون فینگر از دو نوع نسوز قطعات مکعب مستطیل به ابعاد  $15 \times 20 \times 40$  سانتی متر مکعب برش زده شد، سپس مقدار ۱ کیلوگرم از سرباره در دو بوتله مقاوم و در کوره الکتریکی در دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شد، نمونه‌های مکعب مستطیل به صورت مجزا در مذاب سرباره غوطه ور شدند [۵-۱]. سپس با برداشتن مقادیر کمی از سرباره در فواصل زمانی معین توسط آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF)، میزان منیزیت (MgO) که در سرباره حل شد در فواصل زمانی معین محاسبه گردد، که مشخص کننده سینتیک واکنش میان سرباره و نمونه‌ها می‌باشد.

با توجه به ویژگی‌های روش‌های مختلف ارزیابی خوردگی، از

کوره آند، نسوز S55 مقاومت بیشتری در این محیط از خود نشان می‌دهد. تصاویر BSE نسوزهای S55 و P70DL قبل از آزمون فینگر در شکل (۲) نشان داده شده است، ریز ساختار هر دو دیر گداز از ذرات منیزیت تشکیل شده است، که استخوان بندی اصلی را تشکیل داده است و فاز فرعی، اسپینل کرومیت می‌باشد. که به صورت دانه‌های ریز بر روی فاز پریکلاس شکل گرفته است و هم چنین فازهای سفید رنگ در تصاویر دانه‌های کرومیت را نشان می‌دهد [۶-۷].

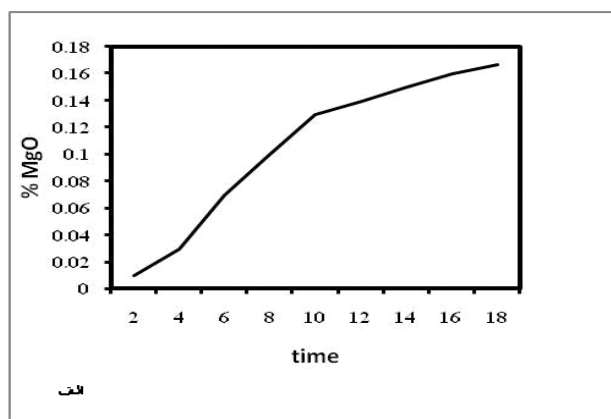
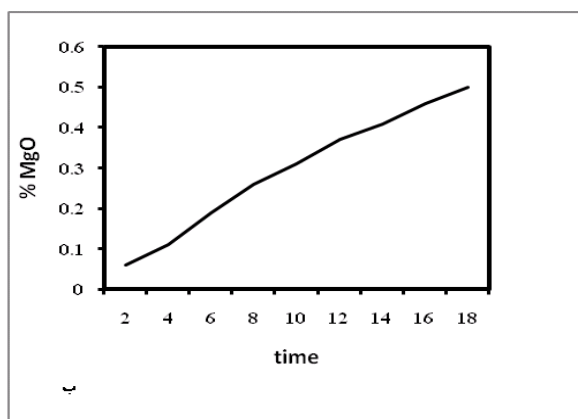
اطراف دانه‌های منیزیت می‌شود، در نتیجه اتصالات و پیوندهای ساختار نسوز را تخریب می‌کند و باعث انحلال منیزیت می‌شود. اما در نسوز باند مجدد، سیلیکات‌های شیشه‌ای به صورت منفصل و جدا از هم شکل می‌گیرند، در نتیجه کمتر بر اتصال و انحلال دانه‌های منیزیت تاثیر می‌گذارد. هم چنین ترکیب شیمیایی نسوزهای مصرفی در جدول (۲) نشان می‌دهد، نسوز S55 از نسبت بالاتر  $CaO/SiO_2$  که معیار مناسبی برای تعیین بازیسیته می‌باشد، برخوردار است. در نتیجه با توجه به بازی بودن سرپاره

جدول (۲) ترکیب شیمیایی و خواص نسوزهای مورد استفاده

ترکیب نسوز	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	تخلخل ظاهری %	دانسیته g/cm <sup>3</sup>
P70DL	۶۰	۱۷	۲	۱	۸	۱۵	۱۹	۳
S55	۵۹	۱۹	۰/۵	۱/۳	۱۳	۶	۱۷	۳/۲

جدول (۳): درصد منیزیت (%MgO) سرپاره با گذشت زمان در آزمون انگشت

زمان (ساعت)	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸
درصد MgO نمونه P70DL	۰/۶۰	۰/۱۱	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۵۰
درصد MgO نمونه S55	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۶۷



شکل (۱): منحنی سینتیک خوردگی به صورت درصد منیزیت (%MgO) بر حسب زمان برای نمونه‌های الف) S55 و ب) P70DL توسط آزمون انگشت

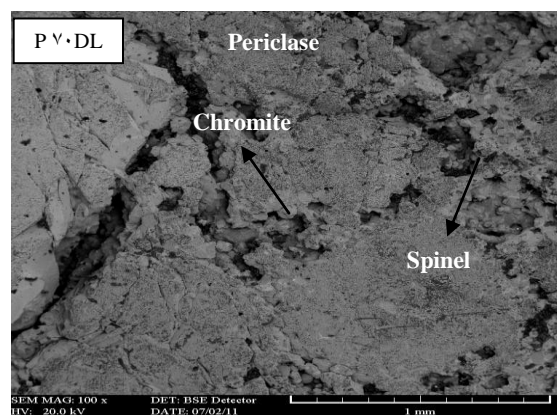
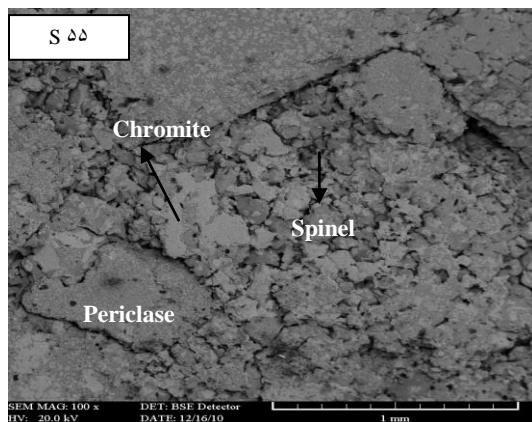
تصاویر BSE از سطح نمونه‌ها در شکل (۳) مشاهده می‌گردد.

به منظور بررسی رفتار بهتر نسوزهای مصرفی پس از آزمون بوت

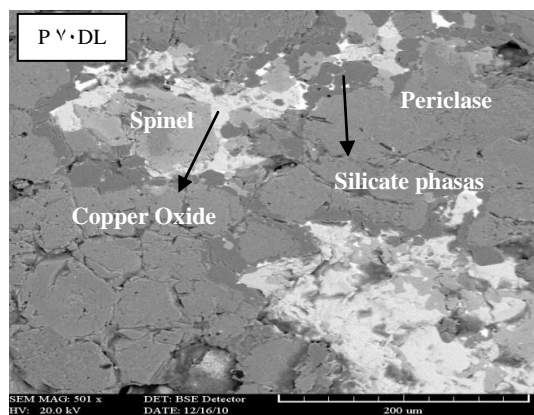
به مقدار کم باعث رشد اسپینل  $(Fe,Mg)(Cr,Al,Fe)2O_4$  می‌شود و افزایش استحکام نسوز را به همراه دارد، اگر در اثر نفوذ زیاد  $FeO$  رشد اسپینل بیش از حد شود، به علت افزایش حجم موضعی در نسوز ایجاد تنش می‌کند، و در نهایت به ترک برداشتن نسوز می‌انجامد. نسوز S55 به علت تخلخل کمتر در مقابل نفوذ اکسید آهن مقاوم‌تر است، بنابراین اسپینل زیاد رشد نمی‌کند [۸]. اکسید مس  $Cu_2O$  به عنوان عامل تر شوندگی نسوز عمل می‌کند و نفوذ سایر اجزا مخرب سرباره را افزایش می‌دهد و لذا باعث انحلال ترکیبات نسوز در سرباره می‌شود، بنابراین فرسایش نسوز را به سرعت افزایش می‌دهد [۹].

تصاویر BSE حضور سرباره را به درون ساختار نسوز تایید می‌کند، هم‌چنین فازهای مشابهی در هر دو نوع نسوز مشاهده می‌گردد.

اکسید آهن به درون پریکلاس نفوذ گسترده‌ای دارد، و در اثر تبادل یونی باعث کاهش نسوزندگی آن از حدود  $2800^\circ C$  درجه سانتی‌گراد به حدود  $1400^\circ C$  درجه سانتی‌گراد می‌شود، فازهای مشابهی در هر دو نوع نسوز مشاهده می‌گردد. یکی از عوامل شیمیایی تخریب نسوز منیزیتی - کرومیتی نفوذ  $FeO$  و سایر اکسیدهای آهن به سطوح باز و تخلخل‌های نسوز می‌باشد که به تشکیل باندهای مایع در ساختار نسوز می‌انجامد. نفوذ  $FeO$  تا حد معینی اثر تخریبی خاصی بر دانه‌های کرومیت ندارد، اکسید آهن



شکل (۲): تصاویر SEM از سطح نمونه‌ها قبل از آزمون بوت



شکل (۳): تصاویر BSE از سطح نمونه‌ها بعد از آزمون بوت

ذوب به صورت متصل و پیوسته اطراف دانه‌های منیزیت می‌شود، در نتیجه اتصالات و پیوندهای ساختار نسوز را تخریب می‌کند و باعث انحلال منیزیت می‌شود. اما در نسوز باندهای مجدد

سیلیس دومین عاملی است که در اثر نفوذ سرباره بر ساختار آجر نسوز تأثیر می‌گذارد، مقداری از سیلیس نفوذ کرده به ساختار نسوز باند مستقیم، باعث تشکیل فاز سیلیکات‌های شیشه‌ای زود

بیشتری هستند، ابتدا نفوذ اکسید مس و اکسید آهن در نسوز بطور پیوسته ساختار اسپینل کرومیت را از بین می‌برد که بوسیله حل کردن آهن و سایر عناصر به جای عناصر نسوز، ساختار باند مستقیم جامد نسوز به ساختار باند مایع تبدیل می‌شود و در نتیجه نسوزهای باند مستقیم به علت تخلخل بالا از نرخ سایش بالاتری نسبت به نسوزهای باند مجدد برخوردارند. هم‌چنین افزایش دانسیته در وجه داغ نسوز انجام می‌گیرد، این مسئله نتیجه اسپینل شدن و تشکیل فازهای سیلیکاتی می‌باشد. شیب غلظتی سرباره در آجر نسوز به عنوان مکانیزم سایش شیمیایی، استحکام را کاهش می‌دهد و ریز ساختار را به نفوذ بیشتر مستعد می‌سازد [۱۳]. در شکل (۴) تصویر و مطالعات فاز شناسی با استفاده از روش پراش پرتو ایکس (XRD) که بر روی سرباره کوره آند انجام شده است، ملاحظه می‌گردد. حضور فاز زود ذوب  $Fe_2MgO_4$  در ترکیبات سرباره تشخیص داده شده است، این ترکیب در اثر تبادل یونی بین سرباره کوره آند و نسوزهای مصرفی بوجود آمده است، و در ساختار نسوز  $Mg^{2+}$  جای خود را به  $Fe^{2+}$  داده است، و فاز فریت منیزیم زود ذوب را به وجود آورده است [۱۴].

در شکل (۵) تصاویر و مطالعات فاز شناسی با استفاده از روش پراش پرتو ایکس (XRD) بر روی نسوزهای S55 و P70DL که توسط آزمون انگشت در دمای  $1350^\circ C$  درجه سانتی‌گراد تحت نفوذ سرباره قرار گرفته‌اند، ملاحظه می‌شود.

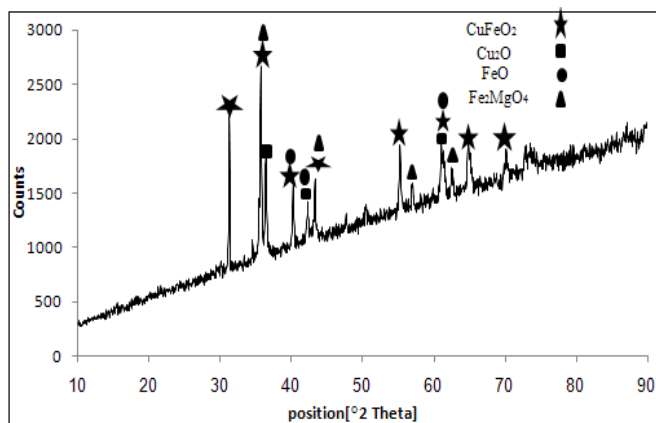
سیلیکات‌های شیشه‌ای به صورت منفصل و جدا از هم شکل می‌گیرند، در نتیجه کمتر بر اتصال و انحلال دانه‌های منیزیت تاثیر می‌گذارد [۱۰]. و معمولا فازهای نفوذ کننده نسوزهای باند مستقیم را از درون شبکه‌های ضعیف و در طول مرز دانه‌های پریکلاس سوراخ می‌کنند، در داخل نسوز اغلب اسپینل را حل می‌کنند، و ساختمان باند نسوز را با یک ساختمان باند مذاب جایگزین می‌کنند. و ساختار جدید به سایش و فرسایش داغ حساس می‌باشد، در نتیجه سایش نسوز را تسریع می‌کنند [۱۱].

اطلاعات جدول (۴) مقدار دانسیته حجمی و تخلخل ظاهری دو نوع نسوز مصرفی مستعمل که از محل خط سرباره کوره آند جمع آوری شده را نشان می‌دهد. علاوه بر نوع نسوز و روش تولید، عوامل زیادی می‌توانند بر روی میزان تخلخل و نفوذ سرباره تاثیر بگذارند. یکی از این عوامل خستگی حرارتی نسوز در اثر تغییرات ناگهانی توسط فرایند شارژ و تخلیه کوره می‌باشد. این تغییر دما بین  $400-500^\circ C$  درجه سانتی‌گراد است که جداره نسوز تحت تاثیر تغییرات دمایی بر اساس سیکل کاری کوره قرار می‌گیرد. اثر این پدیده انبساط حرارتی نسوز می‌باشد و منجر به ایجاد ترک‌های ماکرو در عمق آجرها می‌شود.

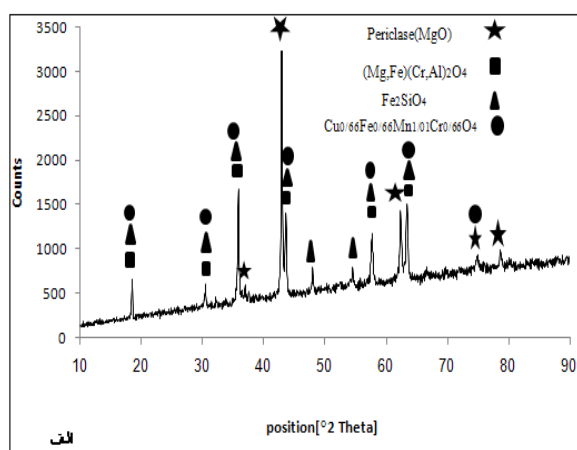
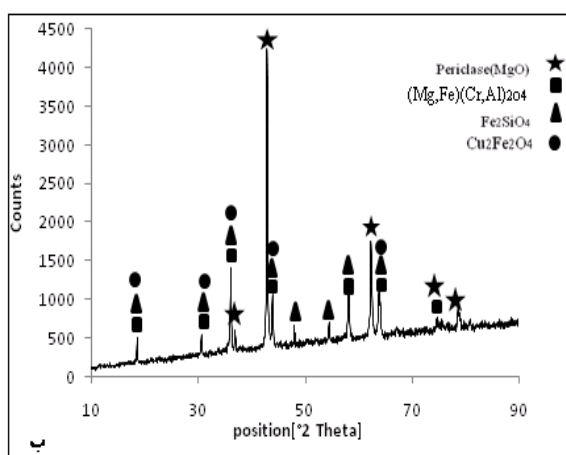
عامل دیگر خستگی مکانیکی نسوز در اثر چرخش کوره می‌باشد. این پدیده تنش‌های مکانیکی سنگین روی نسوز را به همراه دارد و به عنوان یکی از عوامل ایجاد ترک و نفوذ سرباره شناخته شده است [۱۲]. نسوزهای باند مستقیم دارای تخلخل

جدول (۴): مقدار دانسیته حجمی و درصد تخلخل نسوزهای مصرفی

فاصله (cm)	نمونه									
	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۶	۴	۲	
P70DL	۱۷/۹۱	۱۴/۴۲	۱۳/۶	۱۱/۴۶	۱۱/۴۴	۱۰/۹	۱۱/۱	۸/۶۷	۶/۸۸	درصد تخلخل (%)
S55	۱۵/۴	۱۵/۷	۱۴/۶	۱۴/۱	۱۳/۴	۱۰/۸۲	۸/۶۲	۶/۹۱	۵/۰۹	
P70DL	۳/۳۲	۳/۳۸	۳/۹۹	۳/۴۳	۳/۴۳۸	۳/۴۴۶	۳/۴۴	۳/۴۸	۳/۵۱	دانسیته حجمی ( $g/cm^3$ )
S55	۳/۱۲۷	۳/۱۲۴	۳/۱۳	۳/۱۴۲	۳/۱۴۸	۳/۱۷	۳/۱۹	۳/۲۰	۳/۲۲۱	



شکل (۴): تصویر XRD و مطالعات فازشناسی سربراره کوره آند



شکل (۵): تصاویر XRD و مطالعات فازشناسی نمونه‌های الف (S55) و ب (P70DL) بعد از آزمون خوردگی سربراره

ایجاد فازهای زود ذوب باعث زینترینگ و نفوذ سربراره نشود، در میان مواد نسوز مورد آزمایش چنین ویژگی در نسوزهای باند مجدد مشاهده می‌شود.

از آنجایی که نسوزهای باند مستقیم (P70DL) دارای تخلخل بالاتری هستند، مقدار بیشتری از سربراره و ترکیبات مس به ساختار آن‌ها نفوذ می‌کند و در اثر تشکیل باند مایع، نرخ سایش افزایش می‌یابد.

آنالیز تفرق اشعه ایکس حضور فاز زود ذوب فریت منیزیم ( $\text{Fe}_2\text{MgO}_4$ ) با دمای ذوب پایین را در ساختار سربراره کوره آند نشان می‌دهد، این ترکیب در اثر جابجایی یون  $\text{Fe}^{2+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$  در ساختار نسوز، فاز پریکلاس ( $\text{MgO}$ ) را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث کاهش نسوزندگی آجرهای منیزیتی - کرومیتی می‌شود. نفوذ  $\text{Cu}_2\text{O}$  و  $\text{FeO}$  از ساختار سربراره به درون نسوز بطور پیوسته

در هر دو نسوز فازهای سیلیکاتی زود ذوب به صورت ترکیب  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  تشخیص داده شده است، هم چنین فاز اکسید مس به صورت ترکیب با سایر عناصر در ساختار هر دو نوع نسوز نفوذ کرده است و به عنوان یک عامل تر شوندگی به نفوذ سایر اجزاء سربراره کمک می‌کند. در هر دو نوع نسوز تبادل یونی بین اجزاء سربراره و نسوز انجام می‌شود و منجر به کاهش نسوزندگی نمونه‌ها می‌شود.

#### ۴- نتیجه گیری

به طور کلی دستاوردهای این تحقیق عبارتند از: یک نسوز مناسب برای بکارگیری در محیط کوره باید دارای دو ویژگی اصلی باشد، یکی اینکه در دمای پایین استحکام مناسبی را ایجاد نماید و مهم تر اینکه در دماهای ذوب ریزی با

Chromite and Magnesia- Spinel Refractories”, No. 78, PP. 1753-1760, 1995.

- [13] M.D. Crites and M. Karakus, “Interaction of Chrome- free Refractories with Copper Smelting and Converting Slag”, *Industrial Ceramics*, No. 39, PP. 129-134, 2000.
- [14] C.B. Clark and J.S. McDowell, “Basic Brick in Copper Converters- Their Mineralogical”, *Journal of Metals*, No. 46, PP. 119-124, 1991.

ساختار اسپینل کرومیت  $(Mg,Fe)(Cr,Al,Fe)_2O_4$  را از بین می‌برد. و در اثر نفوذ آهن، مس و سایر عناصر ناخالصی بجای عناصر اسپینل، ساختار باند جامد نسوز را به ساختار باند مایع تبدیل می‌کند.

پیشنهاد می‌شود در مناطق حساس و پر تنش کوره از نسوزهای باند مجدد استفاده شود، هم‌چنین جهت کامل شدن تحقیقات در زمینه مواد دیر گداز آزمایش‌هایی برای اندازه گیری PH سرباره و نسوز انجام شود، تا پارامترهای بیشتری در انتخاب نسوز مد نظر قرار گیرد.

## ۵- مراجع

[۱] ف. گلستانی فر، " بررسی بازیافت نسوزهای باطله صنایع مس و استفاده مجدد از آن‌ها،" نشریه فراوری مس، سال ۱۱، شماره ۵۶، ص ۲۷-۱۹، مهر ۱۳۸۷.

[۲] ح. زرگر، " متاورژی مس،" فصل نامه توسعه و تحقیقات مجتمع مس سرچشمه، سال ۴ شماره ۱۵، ص ۴۲-۵۶، اسفند ۱۳۸۳.

[۳] ط. محمودیان، مواد دیرگداز (سرامیک های دیرگداز) ، جلد اول، ص ۳۰۶-۲۵۱، انتشارات جانتان، تهران، بهار ۱۳۷۸.

- [4] M.E. Schlesinger and M.D. Crites, “Assessment of Spinel Containing Refractories for Copper Smelting and Refining”, *Journal of the Australian Ceramic Society*, No 34, pp. 39-44, 1998.
- [5] I. Kessue, “Formation of Precipitated Complex Spinel in Magnesia Chrome Refractories and its Characteristics”, *International Ceramics*, No. 41, pp. 406-412, 1992.
- [6] W. Treffner, “Behavior of Chromite Spinel Related to Microstructure”, *Journal of the American Ceramic Society*, No. 94, pp. 359-364, 1999.
- [7] J.H. Chester, “Refractories Production and Properties”, *Refractory Materials*, No. 66, pp. 230-246, 1998.
- [8] G. W. Liu and M. L. Muolo, “Survey on Wetting of Magnesia Chromite by Molten Metals”, *Journal Ceramic International*, No. 57, pp. 67-79, 2008.
- [9] V. Petkov and P. Jones, “Optimisation of Anode Furnace Lining Using Distinct Magnesia Chromite Refractory Types”, *World of Metallurgy*, Vol. 4, pp. 647-651, 1998.
- [10] B. Boydens and B. Blanpain, “Chemical Corrosion Mechanisms of Magnesia Chromite and Chrome free Refractory Bricks Copper Metal Anode Slag”, *Journal of the European Ceramic Society* , No. 27, pp. 243-258, 2007.
- [11] H. Barthel, “Wear of Chromium- Magnesite Bricks in Copper Smelting Furnaces”, *Interceramics*, No. 30, PP. 250-258, 1981.
- [12] K. Goto and W.E. Lee, “The Direct Bond in Magnesia-