



1808. A



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

بهینه سازی جرم‌های نسوز آلومینا- کاربید سیلیسیم- کربن  
جهت راهگام جوی مذاب

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد- استخراج فلزات

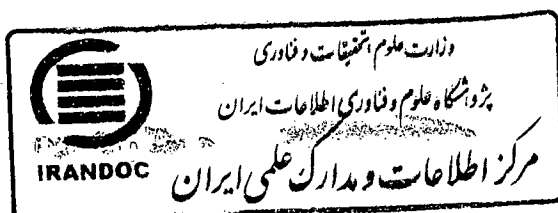
الهام رحیمی

اساتید راهنما

دکتر احمد منشی

دکتر رحمت الله عمادی

تابستان ۱۳۹۰



۱۶۵۵۰۸

۱۳۹۰/۸/ ۱




دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد


پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مواد - استخراج فلزات خانم الهام رحیمی  
تحت عنوان

بهینه‌سازی جرم‌های نسوز آلومینا- کاربید سیلیسیم- کربن  
جهت راهگام جوی مذاب

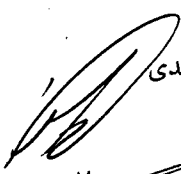
در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۲ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

 دکتر احمد منشی

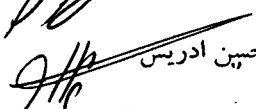
۱- استاد راهنمای پایان‌نامه

 دکتر رحمت الله عمادی

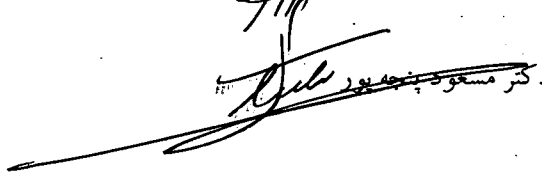
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه

 دکتر علی سعیدی

۳- استاد داور

 دکتر حسین ادريس

۴- استاد داور

 دکتر مسعود بهروز

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

## در آغاز هیچ نبود "کلمه" بود و آن کلمه "خدا" بود

و "کلمه"، بی زبانی که بخواندش و بی اندیشه اش، چگونه می توتند بود؟

و خدا یکی بود جز خدا هیچ نبود و با "نبودن" چگونه می توان "بودن"؟

پس خدا آدمی را آفرید و به او خواندن را آموخت تا اندیشه ای باشد که کلمه را بشناسد و در همه آدمیان عشق به دانستن را قرار داد و در وجود برگزیده ای از آنان عشق به آموختن را نیز. خدای بزرگ را سپاس که مرا نیز در این راه قرار داد و همواره روشنایی بخش آغاز راهم، گرما بخش مسیر تلاشم و کارگشای همیشگی زندگی ام بود.

همچنین از اساتید گرامی آقایان دکتر منشی و دکتر عمادی که در محضر ایشان کلمات زیادی برایم معنی یافت، برای تمام درس هایی که با آرامش و احاطه کامل به من آم.ختند و همراهی همیشگی و مسئولانه شان در طی این مسیر نهایت تقدیر و سپاسگذاری را داشته و همواره به شاگردیشان بر خود می بالم.

همین طور شایسته است که از کلیه مسئولان، کادر اداری و سرپرست آزمایشگاه های دانشکده مهندسی مواد، که کمک فراوانی در انجام این پروژه داشتند، تقدیر و تشکر ویژه ای داشته باشم.

در پایان از همراهی و مساعدت همه دوستان عزیزم که حضورشان مایه دلگرمی و افتخار من در طی این مسیر بود و خواهد بود سپاسگذارم.

این همه بزرگواری را سپاس.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این  
پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان  
است.

تقدیم بہ

ہمسرم

پدر و مادر عزیزم

کہ ہموارہ خواستند تا بودنی زیبا داشتہ باشم

ولذا تمام ہستی خود را بخدمتِ بچہ و ذرہ ذرہ توشہ را ہم ساختند

و پیوستہ گذشت و بنگاہ امیدوارشان تمام تر دیدیم را طی این مسیر بہ یقین

تبدیل می کردہ بی نہایت پاکسازم

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب.....
۱	چکیده.....
<b>فصل اول: مقدمه</b>	
۲	۱-۱- معرفی.....
<b>فصل دوم: مطالعات مروری</b>	
۴	۱-۲- مواد دیرگداز.....
۴	۲-۲- طبقه‌بندی مواد دیرگداز و مقایسه آن‌ها.....
۶	۳-۲- مواد دیرگداز بی‌شکل (مونولیتیک).....
۷	۱-۳-۲- مزایا و معایب دیرگدازهای بی‌شکل.....
۸	۴-۲- اجزاء تشکیل‌دهنده دیرگدازهای مونولیتیک.....
۹	۱-۴-۲- سنگدانه.....
۱۷	۲-۴-۲- عامل چسباننده.....
۱۷	۲-۴-۲- الف- چسب‌های هیدرولیکی.....
۲۲	۲-۴-۲- ب- چسب‌های غیر هیدرولیکی.....
۲۶	۳-۴-۲- مواد پرکننده.....
۳۲	۴-۴-۲- آب.....
۳۲	۵-۲- تقسیم‌بندی جرم‌های دیرگداز.....
۳۳	۱-۵-۲- تقسیم‌بندی براساس روش‌های شکل‌دهی.....
۳۳	۲-۵-۲- تقسیم‌بندی براساس شکل و حالت فیزیکی و ظاهری.....
۳۳	۳-۵-۲- تقسیم‌بندی براساس روش‌های گیرش.....
۳۴	۴-۵-۲- تقسیم‌بندی براساس ترکیب شیمیایی.....
۳۴	۵-۵-۲- تقسیم‌بندی براساس چگالی کلی.....
۳۴	۶-۵-۲- تقسیم‌بندی براساس پیوندها.....
۳۵	۷-۵-۲- تقسیم‌بندی براساس استانداردها.....
۳۵	۸-۵-۲- تقسیم‌بندی براساس میزان سیمان.....
۳۶	۶-۲- مشکلات استفاده از سیمان در جرم‌های نسوز.....
۳۷	۷-۲- جرم‌های کم سیمان.....
۳۸	۱-۷-۲- خواص جرم‌های کم سیمان.....
۴۱	۸-۲- جرم‌های بسیار کم سیمان.....
۴۲	۹-۲- فشردگی، توزیع و رئولوژی مواد.....
۴۳	۱۰-۲- جرم‌های ریختنی بدون سیمان.....
<b>فصل سوم: مواد و روش تحقیق</b>	
۴۵	۱-۳- مواد اولیه مورد استفاده.....
۴۶	۲-۳- تجهیزات مورد استفاده.....

۴۶	.....	۳-۲-۱-ترازو
۴۶	.....	۳-۲-۲- قالب فلزی
۴۶	.....	۳-۲-۳- میز ارتعاش
۴۶	.....	۳-۲-۴- خشک کن
۴۶	.....	۳-۲-۵- کوره الکتریکی
۴۷	.....	۳-۲-۶- دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD)
۴۷	.....	۳-۲-۷- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
۴۷	.....	۳-۲-۸- دستگاه استحکام فشاری سرد (CCS)
۴۷	.....	۳-۳- ترکیب نمونه ها
۴۸	.....	۳-۳-۱- بررسی استفاده از ترکیب پیوند های مختلف در تهیه جرم ها
۴۸	.....	۳-۳-۲- تعیین اندازه دانه
۴۸	.....	۳-۴- دسته بندی جرمهای ساخته شده
۴۹	.....	۳-۴-۱- سری اول نمونه سازی
۵۰	.....	۳-۴-۲- سری دوم نمونه سازی
۵۲	.....	۳-۴-۳- سری سوم نمونه سازی
۵۴	.....	۳-۴-۴- سری چهارم نمونه سازی
۵۶	.....	۳-۵- نحوه انجام آزمایشات
۵۶	.....	۳-۵-۱- نحوه ساخت نمونه ها
۵۶	.....	۳-۵-۲- نحوه اندازه گیری دانسیته و درصد تخلخل ظاهری نمونه ها
<b>فصل چهارم : یافته ها و بحث</b>		
۵۷	.....	۴-۱- نتایج نمونه های با دانه بندی متفاوت
۶۲	.....	۴-۲- تاثیر میزان بهینه ذرات SiC
۶۴	.....	۴-۲-۱- اثر اندازه دانه SiC
۶۶	.....	۴-۳- نتایج سری دوم نمونه سازی
۶۶	.....	۴-۳-۱- نتایج نمونه های خانواده بایندهای فسفاتی
۷۱	.....	۴-۴- نتایج سری سوم نمونه سازی
۷۱	.....	۴-۴-۱- نتایج نمونه های خانواده میکرو سیلیس
۷۴	.....	۴-۴-۲- نتایج نمونه های خانواده پیروفیلیت
۷۷	.....	۴-۴-۳- نتایج نمونه های خانواده آلومین هیدراته
۷۹	.....	۴-۴-۴- نتایج نمونه های خانواده آلومین رآکتیو
۸۰	.....	۴-۵- نتایج سری چهارم نمونه سازی
۸۰	.....	۴-۵-۱- نتایج نمونه های خانواده کروم
۸۲	.....	۴-۶-۲- نتایج نمونه های خانواده زیرکن
۸۵	.....	۴-۷- بررسی رفتار جرم ریختنی در تماس با مذاب
<b>فصل پنجم : نتیجه گیری</b>		
۸۶	.....	۵-۱- نتیجه گیری
۸۹	.....	۵-۲- پیشنهادات
۹۰	.....	فهرست مراجع



## فهرست جداول

<u>صفحه</u>	<u>جدول</u>	
۱۴	جدول ۱-۲	محدوده ترکیب شیمیایی آلومینای ذوبی قهوه ای
۱۵	جدول ۲-۲	ترکیب شیمیایی مینرال های بوکسیت خام
۱۸	جدول ۳-۲	انواع و خواص سیمان های آلومینات کلسیم
۱۹	جدول ۴-۲	انواع فازهای موجود در سیمان های آلومینات کلسیم
۲۰	جدول ۵-۲	خواص مینرال های نسوز
۲۱	جدول ۶-۲	دمای هیدراسیون هیدرات های سیمان آلومینات کلسیم
۲۱	جدول ۷-۲	تغییرات مینرالوژی سیمان های پر آلومین با افزایش دما
۲۴	جدول ۸-۲	اشکال مختلف فسفات ها
۲۶	جدول ۹-۲	انواع و مشخصه های فسفات های سدیم موجود
۲۸	جدول ۱۰-۲	ترکیب شیمیایی میکروسلیس بالک
۳۳	جدول ۱۱-۲	انواع دیرگدازهای بی شکل بر اساس روش شکل دهی
۳۳	جدول ۱۲-۲	طبقه بندی بر اساس روش های گیرش
۳۴	جدول ۱۳-۲	نام و ترکیب تعدادی از دیرگدازهای بی شکل بر حسب ترکیب شیمیایی
۳۴	جدول ۱۴-۲	تقسیم بندی دیرگدازهای بی شکل و یکپارچه ریختنی بر حسب چگالی
۳۵	جدول ۱۵-۲	طبقه بندی نسوز های بی شکل بر حسب نوع مواد اولیه مورد مصرف
۳۶	جدول ۱۶-۲	تقسیم بندی جرم های نسوز بر اساس میزان سیمان
۳۷	جدول ۱۷-۲	ترکیب شیمیایی جرم های ریختنی کم سیمان
۳۹	جدول ۱۸-۲	خواص فیزیکی جرم های ریختنی کم سیمان
۵۰	جدول ۱-۳	درصد ترکیبات نمونه ها با اندازه دانه متفاوت
۵۱	جدول ۲-۳	درصد ترکیبات نمونه های گروه اول از سری اول
۵۱	جدول ۳-۳	درصد ترکیبات گروه فسفاتی
۵۲	جدول ۴-۳	درصد ترکیبات گروه میکروسلیس
۵۳	جدول ۵-۳	درصد ترکیبات گروه پیروفیلیت
۵۳	جدول ۶-۳	درصد ترکیبات گروه آلومین هیدراته
۵۴	جدول ۷-۳	درصد ترکیبات گروه آلومین راکتیو
۵۵	جدول ۸-۳	درصد ترکیبات گروه کروم
۵۵	جدول ۹-۳	درصد ترکیبات گروه زیرکن

## فهرست اشکال

<u>شکل</u>	<u>صفحه</u>
شکل ۱-۲-a: تغییرات دانسیته بالک با آب مورد نیاز برای اختلاط بعد از پخت در دماهای مختلف	۳۹
شکل ۱-۲-b: تغییرات استحکام فشاری سرد با آب مورد نیاز برای اختلاط بعد از پخت در دماهای مختلف	۴۰
شکل ۱-۲-c: تغییرات مدول گسیختگی سرد با آب مورد نیاز برای اختلاط بعد از پخت در دماهای مختلف	۴۰
شکل ۲-۲: تغییرات مدول گسیختگی گرم جرمهای کم سیمان با مقادیر متفاوت از آلومینا	۴۰
شکل ۲-۳: تغییر شکل خزشی جرمهای کم سیمان دارای ۶۰ و ۶۵٪ آلومینا تحت بار ۱۷MPa با زمان	۴۱
شکل ۲-۴: ارتباط بین فشردگی، توزیع و رئولوژی ذرات	۴۲
شکل ۴-۱: نتایجی از نمونه های جرم ریختنی با $q=0.22$ (الف) استحکام و (ب) دانسیته	۵۹
شکل ۴-۲: نتایجی از نمونه های جرم ریختنی با $q=0.24$ (الف) استحکام و (ب) دانسیته	۶۰
شکل ۴-۳: نتایجی از نمونه های جرم ریختنی با $q=0.26$ (الف) استحکام و (ب) دانسیته	۶۰
شکل ۴-۴: نتایجی از نمونه های جرم ریختنی با $q=0.28$ (الف) استحکام و (ب) دانسیته	۶۱
شکل ۴-۵: نتایجی از نمونه های جرم ریختنی با $q=0.30$ (الف) استحکام و (ب) دانسیته	۶۱
شکل ۴-۶: نتایجی از نمونه های جرم ریختنی با $q=0.40$ (الف) استحکام و (ب) دانسیته	۶۲
شکل ۴-۷: استحکام فشاری سرد برای درصدوزنی مختلف SiC (الف) نمونه های خشک شده در دمای $110^{\circ}\text{C}$ و (ب) نمونه های پخت شده در دمای $1400^{\circ}\text{C}$	۶۳
شکل ۴-۸: میزان تغییرات دانسیته با درصد وزنی مختلف SiC (الف) نمونه های خشک شده در دمای $110^{\circ}\text{C}$ و (ب) نمونه های پخت شده در دمای $1400^{\circ}\text{C}$	۶۳
شکل ۴-۹: میزان تغییرات تخلخل ظاهری با درصد وزنی مختلف SiC (الف) نمونه های خشک شده در دمای $110^{\circ}\text{C}$ و (ب) نمونه های پخت شده در دمای $1400^{\circ}\text{C}$	۶۴
شکل ۴-۱۰: نمودار استحکام فشاری برای اندازه ذرات مختلف SiC (الف) اندازه ذرات بر حسب میکرومتر و (ب) اندازه ذرات بر حسب مش	۶۵
شکل ۴-۱۱: نمودار دانسیته برای اندازه ذرات مختلف SiC (الف) اندازه ذرات بر حسب میکرومتر و (ب) اندازه ذرات بر حسب مش	۶۶
شکل ۴-۱۲: پراش اشعه ایکس نمونه جرم ریختنی ۴۶ مش کاربید سیلیسیم (الف) خشک شده در دمای $110^{\circ}\text{C}$ و (ب) پخت شده در دمای $1400^{\circ}\text{C}$	۶۶
شکل ۴-۱۳: نتایج شماتیکی نمونه های جرم ریختنی با انواع بایندهای فسفاتی (الف) استحکام، (ب) دانسیته و (ج) تخلخل	۶۹
شکل ۴-۱۴: نتایج شماتیکی نمونه های جرم ریختنی انواع متفاوت آلومینا (الف) استحکام، (ب) دانسیته	۷۰
شکل ۴-۱۵: الگوی پراش پرتو ایکس باند فسفاتی شامل هگزا متا فسفات سدیم و آلومینایی کلسینهدر دمای $800^{\circ}\text{C}$	۷۰
شکل ۴-۱۶: تصویر SEM نمونه جرم ریختنی حاوی باند فسفاتی شامل هگزا متا فسفات سدیم و آلومینایی کلسینهدر دمای $800^{\circ}\text{C}$	۷۱
شکل ۴-۱۷: نتایج شماتیکی نمونه های جرم ریختنی با درصدهای متفاوت میکروسیلیس (الف) استحکام، (ب) دانسیته و (ج) تخلخل	۷۳
شکل ۴-۱۸: الگوی پراش پرتو ایکس نمونه جرم ریختنی شامل ۶٪ میکروسیلیس و ۶٪ باند فسفاتیدر دمای $1400^{\circ}\text{C}$	۷۴
شکل ۴-۱۹: تصویر SEM نمونه جرم ریختنی حاوی ۶٪ میکروسیلیس و ۶٪ باند فسفاتی در دمای $1400^{\circ}\text{C}$	۷۴
شکل ۴-۲۰: دیاگرام فازی سه تایی $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$	۷۵

- شکل ۴-۲۱: نتایج شماتیکی نمونه های جرم ریختنی حاوی درصد های مختلف پیروفلیت الف) استحکام ، ب) دانسیته و ج) تخلخل ... ۷۶
- شکل ۴-۲۲: الگوی پراش پرتو ایکس نمونه جرم ریختنی حاوی ۲۰٪ پیروفلیت ..... ۷۷
- شکل ۴-۲۳: تصویر SEM نمونه جرم ریختنی حاوی ۲۰٪ پیروفلیت در دمای  $1400^{\circ}\text{C}$  ..... ۷۷
- شکل ۴-۲۴: درصد خروج آب بر حسب زمان ..... ۷۸
- شکل ۴-۲۵: نتایج شماتیکی نمونه های جرم ریختنی با درصد های متفاوت آلومین هیدراته الف) استحکام ، ب) دانسیته و ج) تخلخل ..... ۷۸
- شکل ۴-۲۶: تصویر SEM نمونه جرم ریختنی حاوی ۶٪ آلومینایی هیدراته در دمای  $110^{\circ}\text{C}$  ..... ۷۹
- شکل ۴-۲۷: نتایج شماتیکی نمونه های جرم ریختنی با درصد های متفاوت آلومین رآکتیو و هیدراته الف) استحکام ، ب) دانسیته و ج) تخلخل ..... ۸۰
- شکل ۴-۲۸: نتایج شماتیکی نمونه های جرم ریختنی با درصد های وزنی متفاوت کروم الف) استحکام ، ب) دانسیته و ج) تخلخل ..... ۸۱
- شکل ۴-۲۹: الگوی پراش پرتو ایکس نمونه جرم ریختنی حاوی کروم در دمای  $1400^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۲
- شکل ۴-۳۰: تصویر SEM نمونه جرم ریختنی حاوی ۲٪ کروم در دمای  $1400^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۲
- شکل ۴-۳۱: نتایج شماتیکی نمونه های جرم ریختنی با درصد های متفاوت زیرکن الف) استحکام ، ب) دانسیته و ج) تخلخل ..... ۸۳
- شکل ۴-۳۲: الگوی پراش پرتو ایکس باند شامل هگزا متا فسفات سدیم و کروم و زیرکن در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۴
- شکل ۴-۳۳: الگوی پراش پرتو ایکس نمونه جرم ریختنی شامل ۲٪ کروم و ۱٪ زیرکن در دمای  $1400^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۴
- شکل ۴-۳۴: تصویر SEM نمونه جرم ریختنی حاوی ۲٪ کروم و ۱٪ زیرکن در دمای  $1400^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۴
- شکل ۴-۳۵: واکنش جرم ریختنی بدون سیمان پس از فرار گرفتن ۲۴ ساعت در مجاورت چدن مذاب در دمای  $1400^{\circ}\text{C}$  الف) نمای ظاهری جرم و ب) تصویر رادیوگرافی ..... ۸۵

## چکیده

در سال های اخیر جرم های ریختنی آلومینا - کاربید سیلیسیم - کربن جلب توجه نموده است، که به خاطر مقاومت به خوردگی، پایداری حرارتی و مقاومت به شوک حرارتی می باشد. کاربرد اصلی این دسته از جرم های ریختنی در جوی مذاب و سرباره است. در ابتدای تولید این نوع محصولات، جرم های ریختنی با مقداری سیمان نسوز قسمت عمده ای از محصولات تولیدی را تشکیل می دادند اما به دلیل وجود اکسید کلسیم در سیمان، منجر به کاهش خواص دمای بالای این محصولات می شد که در نتیجه منجر به تولید جرم های کم سیمان خیلی کم سیمان در دهه گذشته شد. در همین راستا در این مطالعه برای بررسی پارامترهای مختلفی نظیر نوع و مقدار مواد اولیه مصرفی و سنگدانه ها، اندازه ذرات مواد اولیه (طبق فرمول آندریازن) و بایندر مناسب در دماهای مختلف پخت، بررسی و چگالی، درصد تخلخل ظاهری و استحکام فشاری سرد نمونه ها اندازه گیری و همچنین مطالعات فازی پراش پرتو ایکس و ریز ساختاری میکروسکوپ الکترونی انجام شد. همچنین در این تلفیق بوکسیت با سیمان سکار ۷۱ و منیزیت کلسینه و هگزا متافسفات سدیم و میکرو سیلیس و آلومینای کلسینه و آلومینایی راکتیو همراه با کاربید سیلیسیم در اندازه های مختلف از ۱۶ تا ۱۲۰۰ مش صورت گرفت و آزمایشات استحکام سرد و دانسیته نشان داد که در دانه بندی ۴۶ مش کاربید سیلیسیم بهترین خواص فیزیکی، مکانیکی را ارائه می دهد. که همراه با آزمایش فازی پراش پرتو ایکس و مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت واز آن جایی که جرم های دیرگداز حاوی مقادیر بیشتر کاربید سیلیسیم از مقاومت بالاتری در برابر سرباره و فلز برخوردارند و همچنین گازهای دی اکسید کربن و منو اکسید کربن تولید شده از اکسیداسیون کاربید سیلیسیم از حرکت فازهای با نقطه ذوب پایین به درون تخلخل های دیرگداز جلوگیری کرده و سبب بهبود خواص شیمیایی جرم های ریختنی می شود. به همین دلیل تاثیر میزان بهینه ذرات کاربید سیلیسیم را بر روی جرم ریختنی مورد مطالعه قرار دادیم و آزمایشات استحکام سرد و دانسیته نشان داد که در دانه بندی ۴۶ مش کاربید سیلیسیم میزان بهینه ذرات کاربید سیلیسیم ۱۵٪ وزنی است و بهترین خواص فیزیکی، مکانیکی را ارائه می دهد. همچنین در این مطالعه از ترکیبات فسفاتی جهت برقراری اتصالات فسفاتی در کنار اتصالات آلومینای هیدراته و زینترینگ سرامیکی در جرم بدون سیمان استفاده شده، نتایج پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی نشان داد که استفاده از هگزا متافسفات سدیم و آلومینای کلسینه به عنوان بایندر فسفاتی در تمامی دماها مخصوصا در محدوده دمایی بحرانی جرم ها  $800-1000^{\circ}\text{C}$  که اتصالات آلومینای هیدراته از بین رفته و اتصالات سرامیکی هنوز تشکیل نشده است مفید می باشد. در اثر اضافه کردن ۲٪ اکسید کروم و ۱٪ زیرکن به عنوان اضافه شونده با هگزا متافسفات سدیم واکنش می دهد و فازهایی نظیر فسفات کروم ( $\text{Cr}_2\text{P}_2\text{O}_8$ ) و فسفات زیرکونیوم ( $\text{ZrP}_2\text{O}_7$ )، در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  تشکیل می دهد. با ایجاد باندهای فسفاتی و اتصال بین ذرات مختلف، خواص جرم را بهبود می بخشد. همچنین در بین سنگدانه های متداول در زمینه جرم نسوز مخلوط پیروفیلیت، شاموت، بوکسیت در کنار باند فسفاتی، جرم نسوز بدون سیمان مناسبی عرضه کرده است.

**کلمات کلیدی:** جرم های ریختنی، جوی مذاب و سرباره، فرمول آندریازن، جرم نسوز بدون سیمان

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱- معرفی

حدود یکصد سال است که فرآورده‌ها و سرامیک‌های دیرگداز در دسته‌های مهم و مستقل رده‌بندی شده‌اند و در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طور کلی دیرگدازها را از لحاظ شکل محصول مورد استفاده می‌توان به دیرگدازهای شکل‌دار و بی‌شکل تقسیم کرد. دیرگدازهای شکل‌دار عمدتاً به شکل آجرهای دیرگداز هستند که می‌توانند با اشکال متفاوتی تولید و سپس در جداره‌های کوره‌ها و سایر قسمت‌های تحت حرارت به عنوان دیرگداز استفاده شوند. وجود مشکلاتی نظیر زمان نصب و تعویض و نیاز به نیروی انسانی زیاد و همچنین مشکلاتی که در حین عملکرد به دلیل وجود درز بین آجرها وجود دارد، سبب شده است که نیاز به جرم‌های دیرگداز یکپارچه که می‌توانند بدون وجود درز و به صورت یکپارچه و پیوسته به عنوان آسترها و دیرگدازها بکار روند، احساس شود. این دیرگدازها را اصطلاحاً مونولیتیک<sup>۱</sup> (یکپارچه) و یا بی‌شکل می‌نامند [۱].

دیرگدازهای مونولیتیک براساس روش‌های استفاده آن‌ها در کاربردهای گوناگون دسته‌بندی می‌شوند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها دیرگدازهای ریختنی (جرم‌ها) می‌باشند. استفاده از جرم‌های ریختنی به ویژه جرم‌های آلومینا-سیلیکا به طور گسترده‌ای در طول ۴۰-۳۰ سال گذشته رواج یافته است. از سال ۱۹۶۰، همراه با تولید و دسترسی

تجاری سیمان‌های آلومینات کلسیم که سیستم اتصالات هیدرولیکی خوبی برای دماهای بالا ایجاد می‌کرد، استفاده از جرم‌های معمولی در دماهای بالا رایج شد [۱].

در جرم‌ها با اتصالات سیمانی، استحکام اولیه از هیدراسیون سیمان ناشی می‌شود و لذا برای افزایش استحکام، باید مقدار مصرف سیمان در آن‌ها افزایش یابد. سیمان افزوده شده جهت مخلوط شدن، نیاز به آب داشته و از طرفی مصرف آب اضافی سبب افزایش تخلخل و کاهش استحکام در این جرم‌ها می‌گردد. همچنین در دماهای متوسط بین  $900-400^{\circ}\text{C}$  به دلیل هیدراسیون سیمان، استحکام جرم کاهش می‌یابد. بر همین اساس و به دلیل مشکلات استفاده از سیمان در این جرم‌ها، در طول دهه ۱۹۷۰ جرم‌های کم سیمان یا کم آب گسترش یافتند.

توسعه جرم‌های ریختنی کم سیمان و خیلی کم سیمان گام رو به جلوی مهمی برای دیرگدازهای منولیتیک فراهم آورد. جرم‌های ریختنی جدید، طول عمر بیشتر، نصب سریعتر و راحت تر و قیمت کمتر دیرگداز را برای مصرف کنندگان فراهم آورده است. با این وجود افزودن میکروسیلیس به سیمان آلومینات کلسیمی باعث ایجاد فازهایی با نقطه ذوب پایین می‌شود و از کاربرد دیرگدازها دما بالای جلوگیری می‌کند. ترکیب سیلیس با سیمان‌های آلومینات کلسیم، باعث بوجود آمدن فازهایی مانند آنورتیت و ژلنیت می‌شود. این فازها نقطه ذوب پایینی در محدوده دمایی  $1450-1380^{\circ}\text{C}$  دارند [۱].

گسترش جرم‌های کم سیمان برای جبران کاهش مقدار سیمان و افزایش کارپذیری جرم با تعویض قسمتی از سیمان با مواد خیلی ریز نظیر رس، میکروسیلیکا و آلومیناهای ریزدانه شروع شد. در ابتدا اگرچه میزان آب مصرفی کاهش یافته بود اما زمان‌های بسیار طولانی برای خشک کردن این جرم‌ها جهت جلوگیری از ایجاد ترک مورد نیاز بود، اما در زمان‌های بعد پیشرفت قابل توجهی در گسترش جرم‌های کم سیمان ایجاد شد [۲].

در این تحقیق برای نخستین بار استفاده از پیوندهای فسفاتی در تهیه جرم‌های بدون سیمان جهت بهبود خواص جرم در طول کاربرد مخصوصاً در محدوده دمایی بحرانی ذکر شده در جرم‌ها، پیشنهاد شد. در این گزارش ابتدا ضمن معرفی کلی دیرگدازها و جرم‌های خیلی کم سیمان و بدون سیمان، با مواد اولیه مختلف مورد استفاده در این جرم‌ها آشنا شده و سپس روش انجام تحقیقات، جهت رسیدن به اهداف موردنظر ذکر می‌گردد و در ادامه مشاهدات به دست آمده مورد ارزیابی و بحث قرار می‌گیرد. در پایان نیز نتایج کلی حاصل شده از این پژوهش بیان می‌شود.

## فصل دوم

### مروری بر مطالب

#### ۱-۲- مواد دیرگداز

مواد دیرگداز به مواد معمولاً غیرفلزی گفته می‌شود که می‌توانند در درجه حرارت‌های بالا پایدار باشند. بنابراین مواد نسوز باید قابلیت حفظ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی موردنظر را در درجه حرارت‌های بالا و شرایط محیط کاربرد، داشته باشند. قدرت پایداری در درجه حرارت‌های زیاد اگرچه یک عامل تعیین کننده برای گروه‌بندی یک ماده به عنوان دیرگداز می‌باشد ولی با این حال انتظار می‌رود که ماده نسوز در برابر نیروهای مخرب دیگری که احیاناً در شرایط عمل با آن‌ها روبرو می‌شود نیز مقاوم باشد. عوامل مخرب شامل: سایش، ضربه حرارتی، حمله شیمیایی و بار مکانیکی زیاد در درجه حرارت‌های بالا می‌باشند. موارد استعمال گوناگون مواد نسوز و شدت و ضعف نیروهای مخرب در شرایط گوناگون استعمال، لزوم تنوع گسترده محصولات نسوز را برای ارضاء آن شرایط روشن می‌گرداند. تعداد محصولات نسوز که با توجه به ترکیبات متنوع و شرایط تولید مختلف به دست می‌آیند آنقدر زیاد است که برای بحث در مورد این محصولات، باید مواد نسوز را طبقه‌بندی نمود [۳].

#### ۲-۲- طبقه‌بندی مواد دیرگداز و مقایسه آن‌ها

در یک تقسیم‌بندی عمومی مواد دیرگداز به دو دسته شکل‌دار (آجرها) و بی‌شکل (دیرگدازهای مونولیتیک یا جرم‌های دیرگداز) تقسیم می‌شوند.

دیرگدازهای مونولیتیک (یکپارچه) با آجرهای دیرگداز تفاوت دارند، زیرا آنها قبل از استفاده شکل داده نمی‌شوند و پخت نمی‌گردند، هرچند که خواص شیمیایی و فیزیکی آنها مشابه با دیرگدازهای شکل‌دار بوده و حتی در برخی موارد دارای ویژگی‌های بهتری می‌باشند. مزیت عمده دیرگدازهای مونولیتیک این است که آنها به ندرت نیازمند هرگونه عملیات برای شکل دادن و عملیات پیش از پخت می‌باشند، بنابراین به میزان قابل ملاحظه‌ای در نیروی انسانی و انرژی مورد نیاز، صرفه‌جویی می‌گردد. مزایای ویژه دیرگدازهای مونولیتیک نسبت به آجرهای دیرگداز عبارتند از:

الف - زمان تولید کوتاه: از آن جا که هیچ‌گونه شکل دادن و پختی در مورد این محصولات صورت نمی‌گیرد، زمان‌های تولید و تحویل کوتاه‌تر بوده و بنابراین گرفتن سفارش کالا توسط مصرف‌کننده، کمتر مورد نیاز است.

ب- صرفه‌جویی در انرژی: از آن جا که هیچ‌گونه عملیات پختی بر روی جرم‌های فوق انجام نمی‌شود، میزان قابل توجهی از انرژی صرفه‌جویی شده و در ضمن به وسایل گران‌قیمت کنترل آلودگی برای گازهای خروجی کوره، نیازی نیست.

ج - آسانی نصب و اجرا: ساخت کوره‌های با راندمان بالا نیازمند اشکال بزرگ و پیچیده‌ای از آجرهای دیرگداز برای دستیابی به عملکرد موردنظر است که مستلزم نیروی متخصص گران‌قیمت و زمان طولانی‌تر برای نصب و تکمیل است. از طرف دیگر، دیرگدازهای مونولیتیک به سازه‌های ساده‌ای نیاز دارند. این دیرگدازها، آسان‌تر نصب شده و به زمان کمتری برای نصب نیاز دارند.

د - پوشش یکپارچه: آسترهای دیرگداز مونولیتیک معمولاً نازک‌تر از ساختارهای آجری و در عین حال بادوام‌تر هستند، زیرا آجرچینی نیازمند استفاده از ملات برای اتصال آجرها به یکدیگر دارد، که بنابراین نقاط ضعیفی (درز) در ساختار ایجاد می‌کند. دیرگدازهای مونولیتیک می‌توانند در اطراف سازه‌های حمایت‌کننده پشتیبان به کار روند و ممکن است در کاربردهایی مثلاً به جای آسترهای قوسی شکل با آجر ضخیم، نیازی به خود پشتیبانی<sup>۱</sup> نداشته باشند.

ه - دوام بالاتر: آسترهای آجرهای دیرگداز در مقایسه با آسترهای مونولیتیک تحت انبساط حرارتی بیشتری قرار می‌گیرند و بنابراین می‌توانند سبب دفرمه شدن (تغییر شکل) یا پوسته شدن ساختار گردند. آسترهای مونولیتیک توسط

<sup>۱</sup> Self-supporting



سازه‌های ثابت شده پشتیبانی می‌شوند که به صورت جلوگیری کننده از حرکت ناشی از تغییرات حرارتی، عمل می‌نمایند. بنابراین، دیرگدازهای مونولیتیک، آسترهای بادوام بیشتری را فراهم می‌آورند.

و - تنوع در تولید: دیرگدازهای مونولیتیک در شکل‌های متفاوتی بر مبنای تکنیک اعمال (نصب) و خواص آن‌ها موجود می‌باشند. بسته به نوع کاربرد، می‌توان از مواد اولیه و دانه‌بندی‌های مختلفی استفاده نمود. روش‌های خاص متفاوتی برای شیوه‌های نصب توسعه یافته است، به گونه‌ای که دیرگدازها می‌توانند توسط پاشیدن، ریختن، ماله کشی، کوبیدن<sup>۱</sup>، وصله زدن<sup>۲</sup> (تعمیر) یا تزریق، اعمال شوند.

ز- کاربردهای مختلف: دیرگدازهای مونولیتیک می‌توانند برای تعمیر موضعی به کار روند و باعث صرفه‌جویی در مواد مصرفی، زمان و نیروی انسانی مورد نیاز جهت نصب شوند.

خ- استفاده به عنوان درزگیر: دیرگدازهای مونولیتیک یک انتخاب ایده‌آل برای نصب در دیواره‌های با قابلیت آب بندی (درزگیری) نسبت به گاز است و بنابراین برای ساخت مخازن تحت فشار که در فشارها و دماهای بالا عمل می‌کنند، مناسب‌تر می‌باشند [۴].

لذا در ادامه به بحث در مورد این دسته از مواد دیرگداز که موضوع مورد بررسی در این پروژه نیز می‌باشد پرداخته خواهد شد.

## ۲-۳- مواد دیرگداز بی‌شکل (مونولیتیک)

این عبارت انتخاب صحیحی برای «جرم‌های دیرگداز» یا جرم‌های ریختنی است که امروزه هنوز هم به تناوب به کار می‌روند. تعریف عمومی دیرگدازهای مونولیتیک با توجه به استانداردهای ISO 1927 و ENV 1402-1، به شرح زیر است:

مواد دیرگداز بی‌شکل به مخلوط‌های شامل سنگدانه‌ها و یک یا چند چسب آماده شده برای استفاده مستقیم بعد از خرید یا بعد از افزودن یک یا چند مایع مناسب گفته می‌شود. این مونولیتیک‌ها می‌توانند حاوی الیاف فلزی، آلی و

<sup>1</sup>. Ramming

<sup>2</sup>. Patching

سرامیکی باشند. همچنین این مخلوط‌ها می‌توانند متراکم یا متخلخل باشند. عمدتاً مخلوط‌های متخلخل دارای تخلخل واقعی بیش از ۴۵٪ می‌باشند.

### ۲-۳-۱- مزایا و معایب دیرگدازهای بی‌شکل

بکارگیری و مصرف این مجموعه از نسوزها مزایا و معایبی دارد که شناخت آنها راهگشای انتخاب و مصرف مناسب و بهینه دیرگدازهای بی‌شکل خواهد شد [۴].

### مزایای دیرگدازهای بی‌شکل

- فرآیند تولید کوتاهتری نسبت به ساخت آجرهای دیرگداز دارند. زیرا در ساخت جرم‌ها مراحل شکل‌دهی و پخت در دمای بالا حذف می‌شود. از طرف دیگر، فرآیند ساخت این جرم‌ها بسیار آسان است و به سرمایه‌گذاری سنگین خرید تجهیزات و ماشین‌آلات احتیاج ندارد، لذا قیمت تمام شده کمتری خواهند داشت.
- نداشتن مرحله پخت، جلوگیری از اتلاف انرژی، کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی محیط زیست از دیگر نکات مهم و حیاتی‌اند که کاهش قیمت تولید و صرفه‌جویی در هزینه ساخت را در پی خواهد داشت.
- جرم‌های دیرگداز امروزه برای افزایش بازدهی حرارتی به کار می‌روند و به دیرگدازهای شکل‌دار برای راهگاههای پیچیده کوره نیازی نیست.
- امکان تعمیرات گرم کوره با استفاده از جرم‌های دیرگداز یکپارچه افزایش می‌یابد و زمان تعمیرات کوره نیز کاهش می‌یابد.
- استفاده از ملات با ترکیبی متفاوت از آجرها معضل بزرگی در ساخت کوره‌هاست که سبب تخریب تدریجی و کاهش طول عمر کوره می‌شود. با استفاده از جرم‌های دیرگداز یکپارچه این مشکل نیز کاهش می‌یابد.
- مقاومت مکانیکی بهتر آنها در مقابل لرزش و ضربه نسبت به آجرها منجر به افزایش عمر نسوزها می‌گردد.
- جرم‌های دیرگداز یکپارچه در مقایسه با دیرگدازهای شکل‌دار، انبساط حرارتی کمتری دارند.
- این نوع دیرگدازها در کوره‌هایی با دیواره‌های ضد نفوذ گاز نیز استفاده می‌شوند.
- می‌توان دیرگداز یکپارچه را در حین نصب به هر شکلی در آورد.

- معمولاً دیرگداز یکپارچه چگالی کمتری به نسبت دیرگدازهای شکل دار دارد.

### معایب دیرگدازهای بی شکل

اشاره به جنبه‌های منفی این نوع دیرگدازها، موجب می‌شود تا در زمان پیشنهاد و انتخاب آنها دقت لازم مبذول شود. عمده‌ترین معایب آنها عبارتند از:

- از آنجا که عملیات خشک کردن و پخت در خارج از کارخانه تولیدکننده صورت می‌گیرد، امکان بروز خساراتی به دلیل اشتباه در نصب و عملیات حرارتی نامناسب، وجود دارد.
- انبارداری جرم‌های دیرگداز یکپارچه به علت تغییر میزان رطوبت آنها با گذشت زمان بسیار مشکل است، به طوری که امکان تخریب خواص جرم نیز وجود دارد. لذا این دیرگدازها بسته‌بندی دقیقی را می‌طلبند.
- پیش‌بینی رفتار ترمومکانیکی دیرگدازهای شکل دار قبل از بهره‌برداری در مقایسه با جرم‌های بی شکل دقیق‌تر است.
- اشکالات ظاهری آجرها را قبل از مصرف می‌توان با مشاهده ظاهر آنها از جمله ترک و لب پریدگی تشخیص داد. در حالی که اشکالات این جرم‌ها را نمی‌توان مشخص کرد.

ارزیابی کیفیت این تولیدات می‌تواند با روشهایی همچون مطالعه فرمولاسیونها و مواد اولیه مصرفی انجام پذیرد [۴]. در یک نگاه روشن می‌شود که مواد اولیه‌ای که طی سالیان اخیر در سطح جهان برای تولید مونولیتیکها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند نتوانسته‌اند در ایران از جایگاهی برخوردار گردند. در نتیجه این موضوع باعث محدودیت تنوع و عدم بهبود کیفیت محصولات مونولیتیک در ایران گشته است. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که نوآوریهای حاصله در این بخش از صنعت نتوانسته‌اند در ایران به مورد اجرا گذاشته شوند به طوری که مواد اولیه مصرفی این صنعت از لحاظ تنوع و کیفیت عیناً همان مواد اولیه‌ای است که حدوداً از سالهای ۱۳۵۵ برای اولین بار در ایران مورد استفاده قرار می‌گرفته است. می‌توان دریافت که محصولات تولیدی کنونی تفاوت فاحشی از نظر کیفی با محصولات آن زمان ندارند. این در حالیست که صنایع مصرف‌کننده مواد نسوز در این دوران حرکت شتابانی به جلو داشته‌اند [۵].

### ۲-۴- اجزاء تشکیل دهنده دیرگدازهای مونولیتیک

دیرگدازهای مونولیتیک مخلوطی از مواد دیرگداز نبوده و به طور کلی از اجزاء مختلفی که در ادامه به تشریح هر یک از آنها خواهیم پرداخت تشکیل شده‌اند. تلفیق اجزاء سازنده، واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی را ایجاد می‌کند که هر دو مورد در زمان نصب در محل مورد کاربرد به وقوع می‌پیوندند. عملکرد دیرگدازهای مونولیتیک

بستگی به مواد خام (اولیه) دارد که در فرمولاسیون آنها استفاده می‌شود [۶]، در نتیجه مواد خام نقش مهمی در محصول نهایی ایفا می‌کنند و سزاوار است توجه خاصی به آنها معطوف داشت.

ترکیب مواد اصلی بتن‌های دیرگداز به طور کلی عبارتند از:

۱- سنگدانه نسوز

۲- عوامل چسباننده

۳- مواد پرکننده

۴- آب

#### ۲-۴-۱- سنگدانه نسوز

این دسته از مواد بالاترین مقدار و بدنه اصلی محصول دیرگداز را تشکیل می‌دهد و برحسب نوع و کاربرد محصول انتخاب می‌شود. اکثریت دیرگدازهای مونولیتیک دارای مقادیر بالا از آلومینا یا مواد آلومینا سیلیکاتی هستند. سنگدانه‌های دیرگداز آلومینا بالا که در فرمولاسیون دیرگدازهای مونولیتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند، از آلومینای تبلور<sup>۱</sup> (صفحه‌ای شکل)، آلومینای ذوبی سفید<sup>۲</sup> و قهوه‌ای، بوکسیت کلسینه شده، مولایت کلسینه شده یا زینتر شده و آلومینا سیلیکات‌هایی که در آنها فاز مولایت غالب است و دارای بیش از ۵۰٪ آلومینا هستند، تشکیل یافته‌اند [۷].

#### •- آلومین

آلومین مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین سرامیک اکسیدی است که کاربردهای وسیع در زمینه‌های مختلف شامل نسوزها، چینی‌ها، کاشی‌های ضدسایش، ابزار برش، بیوسرامیک‌ها، ساینده‌ها،... دارد. کلمه آلومین دربرگیرنده کلیه محصولات مختلف آلومینی از نظر دانه‌بندی، تخلخل، میزان شیشه و ناخالصی‌های متفاوت است. ترکیباتی با خلوص ۹۵-۸۵٪ آلومین، به وسیله روش‌های اکستروژن، پرس یا ریخته‌گری به کار می‌روند. در طی پخت فازهای زودگداز سبب چسبندگی دانه‌های آلومین می‌شود. بدنه‌های با خلوص بالاتر خواص مکانیکی و الکتریکی بهتری دارند و لیکن شکل‌دهی آنها مشکل‌تر بوده و نیاز به پخت در دماهای بالاتر دارند. فرآیندهای مصرفی برای شکل دادن پودر آلومین شامل اکستروژن، ریخته‌گری دوغابی، پرس خشک (عمدتاً به کمک یک روان‌ساز)، پرس ایزواستاتیک و

<sup>۱</sup> Tabular Alumina

<sup>۲</sup> Fused Alumina