

*Do you know new
Zohreh Tile?*



CERSAIE

کاشی گرانیت
کاشی لعاب
زهرة



خراسان رضوی / کاشمر / کیلومتر ۱۲ محور کاشمر، مشهد / جنب شهرک صنعتی

تلفن: (۰۲۰ خط) ۰۵۱-۵۵۳۸۳۵۹۱ - نامبر: ۰۵۱-۵۵۳۸۳۵۸۳ - www.ZohrehTile.com



- انواع آجرهای نسوز شاموتی و آلومینایی
- انواع آجرهای دولومیتی پک باند و رزین باند تمپر شده
- انواع آجرهای منیزیتی، منیزیت گرافیت، منیزیت کرومیت و منیزیت اسپینل
- انواع آجرهای دریچه کشویی منیزیتی و آلومینایی
- انواع ملات ها و جرم های آلومینایی، منیزیتی و دولومیتی
- انواع جرم های ریختنی، کوبیدنی و پاشیدنی کوره بلند
- آهک صنعتی
- دولومیت کلسینه



شرکت فرآورده های نسوز آذر

Azar Refractories Co

www.Azarref.ir
Sales@Azarref.ir



آدرس: کیلومتر ۵ جاده اصفهان شهرکرد - شهرک صنعتی فولاد
کد پستی: ۸۴۷۷۱۴۷۱۶۱
تلفن: ۰۳۱-۵۲۳۵۲۷۵۵
تلفن فروش: ۰۳۱-۵۲۳۵۲۷۳۴-۵
فکس فروش: ۰۳۱-۵۲۳۵۲۷۵۹
تلفن های شرکت: ۰۳۱-۵۲۳۵۲۶۶۲-۵
فکس شرکت: ۰۳۱-۵۲۳۵۲۷۵۴



سال نهم، شمارهٔ چهارم و ششم

تابستان ۱۳۹۵

ISSN: ۱۷۳۵-۳۳۵۱

« با درجهٔ علمی ترویجی »

صاحب امتیاز: انجمن سرامیک ایران

مدیر مسئول: دکتر مسعود محبی

سر دبیر: دکتر علیرضا سوری

مدیر اجرایی: سعیده علیشاهی

گردآوری مطالب: محبوبه پیریایی

نشانی: تهران، نارمک، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکدهٔ

مهندسی مواد و متالورژی، دفتر انجمن سرامیک ایران

صندوق پستی: تهران، ۱۱۱-۱۶۸۴۵

تلفن: ۷۷۸۹۹۳۹۹

دورنگار: ۷۷۸۹۹۳۹۹

پست الکترونیکی: info@jicers.ir

نشانی سایت اینترنتی: www.jicers.ir

طراحی، گرافیک و صفحه‌آرایی: تمام طرح ۷۷۲۰۹۲۲۸

اصلاح و خلاصه کردن مطالب با نظر مترجمان و نویسندگان انجام می‌شود. مسئولیت محتوای مقالات به عهدهٔ نویسندگان و مترجمان است. مطالب ارسالی برگردانده نمی‌شود.

هیات تحریریه:

دکتر علیرضا آقایی	پژوهشگاه مواد و انرژی
دکتر محمد رضوانی	دانشگاه تبریز
دکتر رسول صراف ماموری	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر پروین علیزاده	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر حسین مولایی	شرکت اپرانا
دکتر علیرضا میرحبیبی	دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر رحیم نقی زاده	دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر علی محمد هادیان	دانشگاه تهران
دکتر عباس یوسفی	شرکت لعاب مشهد

گروه مشاوران:

مهندس جلیل آراین پو	شیشه اردکان
مهندس سیروس ارجمند نیا	شرکت بازرگانی گیتا
دکتر علی اصغر بهنام قادر	پژوهشگاه مواد و انرژی
مهندس نادر خلیلی	شرکت نسوز مهر
مهندس سیروس روشنفکر فلاح	شرکت تجهیز مواد پیشگام
مهندس میر حسام الدین داعی نیاکی	شرکت گل سرخ گستر امل
مهندس محمود سالاریه	شرکت آرمیناز
دکتر آرمان صدقی	دانشگاه بین الملل امام خمینی
دکتر احمد صفری	دانشگاه ایالتی نیوجرسی
مهندس حسین عزیزیان	صنعت سیمان
مهندس مهران غفاری	پژوهشگاه مواد و انرژی
دکتر عباس فاضلی	سازمان زمین شناسی کشور
دکتر کاووس فلامکی	دانشگاه امیرکبیر
مهندس عباسعلی قصابی	شرکت چینی زرین ایران
مهندس حسین قصابی	دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر ابراهیم قاسمی	پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ
دکتر کاظم قنبری	دانشگاه شفیلد انگلستان
دکتر مهرداد کشمیری	دانشگاه بریتیش کلمبیا
دکتر علیرضا گنجی	شرکت معدنی و صنعتی سوراوجین عقیق
مهندس حمیدرضا نعمتی	پیشگامان سرامیک برسام
دکتر امیر عباس نوربخش	سرامیک نوین سپاهان

۱	تازه‌ها
۱	اخبار انجمن سرامیک ایران
۱	فراخوان یازدهمین کنگره دوسالانه و دومین همایش بین‌المللی انجمن سرامیک ایران
۲	چهارمین گردهمایی تخصصی صنعت شیشه کشور
۵	اخبار اعضای حقوقی
۵	خاک خوردن کاشی و سرامیک داخلی در انبار با موج واردات محصولات خارج
۵	تودیع و معارفه رئیس پژوهشکده سرامیک برگزار شد
۶	حضور دانشجویان بین‌المللی در پژوهشگاه مواد و انرژی
۷	اخبار علمی
۷	استفاده از نانوپوشش در اگزوز «موتورسیکلت یاماها»
۷	افزودن نانوذرات موجب افزایش هدایت گرمایی روغن موتور می‌شود
۸	بهبود خواص سرامیک‌های مورد نیاز صنایع هوافضا با سبوس برنج
۹	تبدیل حرارت تلف‌شده به برق به کمک نانوساختارهای قفس مانند
۱۰	دانشگاه صنعتی امیرکبیر: جداسازی بهینه‌ی گازها به کمک غشاهای نانوکامپوزیتی
۱۱	نانوذراتی که نور خورشید را با کارایی ۹۰ درصد به گرما تبدیل می‌کند
۱۲	مصاحبه با مهندس فرزاد معصومی
۱۶	مقالات پژوهشی
۱۶	بررسی جذب سطحی ۴ کلو ۲ نیتروفلن از محلول‌های آبی بر روی بنتونیت عامل‌دار
۲۲	مقالات مروری
۲۲	روش‌های اندازه‌گیری کشش سطحی مایعات
۳۳	اندازه‌گیری آنلاین خوردگی دیرگداز کوره با استفاده از تغییرات دما
۴۴	آلومینا، روش‌های تهیه و خواص سطحی آن
۵۲	مروری بر رفتار اکسیداسیون مکس فاز Ti_2AlC در اتمسفر هوا
۶۱	مقدمه‌ای بر مواد مکمل سیمانی - بخش ۱
۷۰	تازه‌های نشر
۷۱	معرفی پایان‌نامه‌های تحصیلات تکمیلی
۷۳	واژه‌گزینی سرامیک با همکاری فرهنگستان زبان و ادب فارسی
۷۷	لیست اعضای حقوقی انجمن سرامیک ایران
۸۵	تقویم رویدادهای سرامیک

اخبار انجمن سرامیک ایران

فراخوان یازدهمین کنگره دوسالانه و دومین همایش بین‌المللی انجمن سرامیک ایران

۲۶ الی ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۶

16-18 May 2017

تهران - پژوهشگاه نیرو

انجمن سرامیک ایران با همکاری پژوهشگاه نیرو یازدهمین کنگره دوسالانه و دومین همایش بین‌المللی خود را در تاریخ ۲۶ الی ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۶ برگزار خواهد کرد. این همایش بزرگترین رویداد در حوزه سرامیک کشور است که با سابقه ای بیش از بیست سال، هر دو سال یکبار با حضور استادان، پژوهشگران، صنعتگران، متخصصین و دانشجویان از ایران و دیگر کشورها با حضور تعدادی از سخنرانان شاخص بین‌المللی انجام می‌شود. نمایشگاه جانبی نیز برای ارائه محصولات و تجهیزات شرکت‌های داخلی و خارجی دایر خواهد بود.

محورهای کنگره:

- ✓ سرامیک در انرژی، برق و نیرو
- ✓ سرامیک در آب و محیط زیست
- ✓ سرامیک در پزشکی و سلامت
- ✓ سطح، فصل مشترک و پوشش‌های سرامیکی
- ✓ فرایند و فناوری در صنعت سرامیک
- ✓ پیشرفت‌های اخیر در صنعت شیشه، دیرگداز و کاشی
- ✓ نوآوری در سنتز و فرآوری مواد اولیه
- ✓ پیشرفت‌های اخیر در صنعت سرامیک ایران

دبیران کنگره:

- دکتر فرهاد گلستانی فرد: دبیر کنگره
- دکتر حمید رضا رضایی: دبیر علمی
- دکتر مسعود محبی: مدیر علمی
- دکتر باوند و دکتر قاسمی و مهندس طارمسری به عنوان مدیران کنگره
- سعیده علیشاهی: مدیر اجرایی

آدرس ایمیل کنگره: Congress2017@icers.ir

چهارمین گردهمایی تخصصی صنعت شیشه کشور



چهارمین گردهمایی تخصصی صنعت شیشه در تاریخ دهم شهریورماه ۹۵ به میزبانی شرکت شیشه همدان با مشارکت انجمن صنفی شیشه و گروه تخصصی شیشه انجمن سرامیک ایران در محل برگزاری همایش‌های شهرک صنعتی بوعلی همدان برگزار گردید. در این همایش بیش از ۲۰۰ نفر از مدیران عامل صنایع شیشه و کارشناسان و اساتید دانشگاه و دانشجویان شرکت کردند.

پس از تلاوت قرآن مجید و پخش سرود جمهوری اسلامی، جناب آقای دکتر فخریم هاشمی، مدیریت شیشه همدان، به شرکت‌کنندگان در این گردهمایی خوش آمد گفت و درباره پیشینه و برنامه‌های این شرکت صحبت کرد.

ایشان در سخنان خود اشاره داشتند که شرکت شیشه همدان، ابتدای سال ۵۴ با سرمایه اولیه ۳۰۰ میلیون ریال تاسیس و به ثبت رسیده است. فاز یک این کارخانه در محل فعلی کارخانه، در اواخر سال ۶۰ به بهره‌برداری رسیده است. فاز دوم کارخانه در ابتدای سال ۷۸ راه‌اندازی شد و بهره‌برداری از آن همچنان ادامه دارد. همچنین ایشان درباره طرح توسعه کارخانه (ایجاد فاز سوم) این‌گونه بیان کردند: این طرح تا حدود زیادی پیشرفت داشته و از منابع خود بیش از ۱۲۰ میلیارد تومان هزینه داشته است که طراحی کوره آن توسط شرکت Sorگ آلمان صورت گرفته و ماشین‌آلات و تجهیزات مورد

نیاز هم بررسی و انتخاب شده که امیدوار هستیم با حمایت دولت تا نیمه نخست سال ۹۷ راه‌اندازی شود.



آقای دکتر فخری هاشمی در ادامه بیان کردند: امروز در حالی که با تمام تلاش در حال اجرای طرح توسعه جدید هستیم، با



بهره‌گیری از توان و همت مدیران و کارشناسان داخلی و خارجی آمادگی داریم تا در عرصه جهانی و بازار داخلی با حمایت مسئولان دولتی به ویژه مدیریت ارشد استان ایفای نقش کنیم.

پس از ایشان جناب آقای مهندس موسوی از شرکت ویژه لیا به ارائه مباحثی پیرامون روش‌های تولید الیاف شیشه، انواع و کاربردها پرداختند.

سپس جناب آقای فخری هاشمی، ارزیابی و دیدگاه مصرف کنندگان در خصوص بسته بندی شیشه‌ای در مقایسه با سایر بسته‌بندی‌های مواد غذایی را ارائه کردند.



پس از استراحت کوتاهی، جناب آقای مهندس زجاجی، دبیر انجمن صنفی شیشه، ضمن ارائه گزارشی از عملکرد و برنامه‌های انجمن صنفی صنعت شیشه ایران، درباره اقدامات متعدد این انجمن برای بهبود شرایط صنعت شیشه کشور صحبت کردند که برگزاری جلسات تدوین استاندارد و بررسی شرایط صادرات شیشه از آن جمله‌اند.



ایشان ضمن ابراز تاسف از شرایط پیش آمده برای شرکت شیشه آگینه که منجر به رکورد و تعطیلی این کارخانه شده است، به یکی از موضوعات مورد پیگیری در این انجمن اشاره و بیان کردند: «آنتی دامپینگ» (در تجارت بین‌الملل به اقدامات ضد قیمت‌شکنی اطلاق می‌شود) شاید کابوس این روزهای صنعت شیشه در کشور باشد چرا که صادرات شیشه ایران به این کشور، دست به آنتی‌دامپینگ علیه ما زده است، در حال حاضر هم کشور هندوستان که حدود ۶۰

هزار تن صادرات به این کشور داریم، آنتی دامپینگ شیشه ایران را به مدت ۵ سال درخواست کرده است. ایشان با تاکید بر وجود تعرفه و توافقات ترجیحی با کشورهای هند و ترکیه تشریح کرد: آنتی دامپینگ صنعت شیشه ایران، صادرات این محصول را دچار مشکلات عدیده‌ای می‌کند و دولت باید برای این مشکل تدبیری اتخاذ کند.

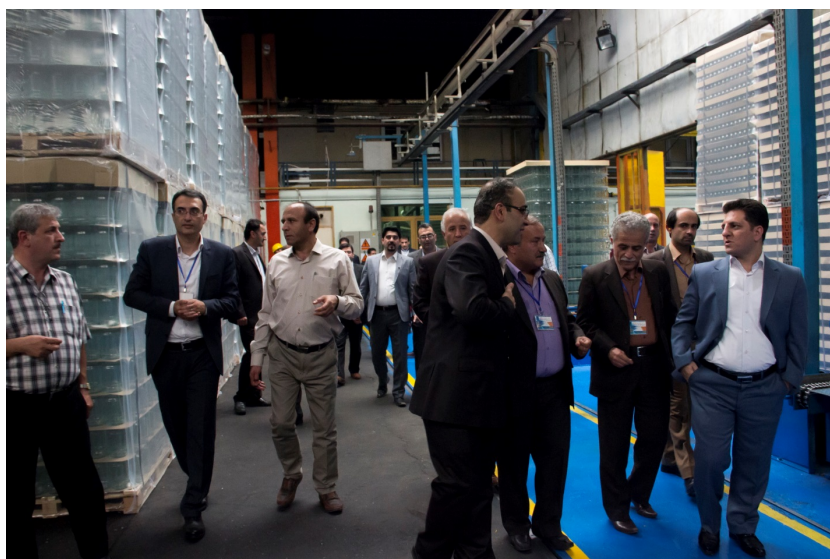
وی در ادامه با اشاره به میزان تولید صنعت شیشه در بخش‌های مختلف خاطر نشان کرد: تولید شیشه در کشور سالانه یک میلیون و ۴۸۰ هزار تن و شیشه بسته‌بندی ۳۵۸ هزار تن است. تولید ظروف رومیزی در صنعت شیشه کشور، ۲۹۰ هزار تن و شیشه اتومبیل ۵۰ هزار تن است همچنین سایر صنایع شیشه میزان هزار تن در سال تولید می‌شود.

آقای مهندس زجاجی در پایان از برگزاری دور بعد این گردهمایی تا پایان سال در شرکت لیا خبر دادند.

سپس جناب آقای مهندس قارلقی - عضو گروه شیشه کاوه به بررسی نقش SO_3 و مفهوم BRN در شیشه پرداختند.

و سپس جناب آقای دکتر کشاورزی عضو هیئت علمی پژوهشگاه مواد و انرژی، درباره شیشه‌های استحکام بالا و مدیریت انرژی مواد سخنانی را ارائه فرمودند.

و در آخر شرکت کنندگان به بازدید از خط تولید کارخانه شیشه همدان پرداختند.



اخبار اعضای حقوقی

خاک‌خوردن کاشی و سرامیک داخلی در انبار با موج واردات محصولات خارج

۲۸ مرداد ۹۵

جعفر سرقینی معاون وزیر صنعت معدن و تجارت در نشست خبری خود با خبرنگاران، میانگین ظرفیت فعال صنایع کاشی و سرامیک را در سال گذشته ۸۰ درصد عنوان کرد و گفت: هم اکنون ۸۰۰ میلیون متر مربع کاشی و سرامیک در انبارها دپو شده که بیشتر به دلیل نبود بازار است.

اوایل سال جاری، رئیس انجمن تولیدکنندگان و صادرکنندگان کاشی و سرامیک با بیان اینکه ۲۰۰ میلیون مترمربع کاشی و سرامیک در انبار کارخانجات مانده، گفته بود: این میزان کالا معادل مصرف بیش از یک سال کشور است. مقایسه دو آمار فوق نشان می‌دهد در سال جاری اوضاع فروش کارخانجات کاشی و سرامیک، بدتر هم شده و حجم بیشتری از تولیدات آن‌ها روی دستشان باقی مانده است.

همچنین در حالی که معاون نعمت‌زاده مدعی است کارخانجات کاشی و سرامیک در سال گذشته با ۸۰ درصد ظرفیت کار کرده‌اند، رئیس انجمن تولیدکنندگان و صادرکنندگان کاشی و سرامیک اعلام کرده که در سال گذشته کارخانجات کاشی و سرامیک با ظرفیت کمتر از ۵۰ درصد کار می‌کردند و حتی تعدادی تعطیلی واحدهای خود را اعلام کردند. در شرایطی که مسئولان دولتی نیز بر بحران در صنعت کاشی و سرامیک صحنه گذاشته‌اند، آمارهای گمرک از واردات انبوه محصولات سرامیکی ساختمانی در سال جاری خبر می‌دهد.

بر اساس آمار گمرک، در ۴ ماه نخست امسال، محصولات سرامیکی ساختمانی از کشورهایی چون چین، هند، آلمان، فنلاند، اتریش، اسپانیا، ترکیه، ایتالیا و امارات به کشور وارد شده است.

هرچند شاید در نگاه اول، حجم واردات محصولات سرامیکی ساختمانی به کشور نسبت به کل تقاضای داخلی زیاد نباشد، اما همین حجم نیز نشان می‌دهد سیاست‌های مدونی برای حمایت از تولید داخل در شرایط رکود عمیق صنایع ساختمانی وجود ندارد.

موج بی‌رویه واردات محصولات کاشی و سرامیک در سال جاری در حالی رخ داده که رهبر معظم انقلاب اسلامی از ابتدای سال جاری بر لزوم جلوگیری از واردات کالاهای دارای مشابه تولید داخل تاکید کرده‌اند. با این حال، مسئولان دولتی همچنان در خواب غفلت به سر می‌برند.

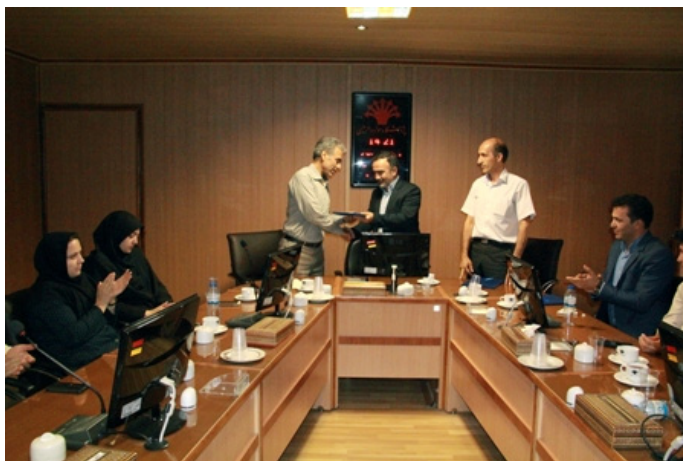
تودیع و معارفه رئیس پژوهشکده سرامیک

برگزار شد

۲۵ مرداد ۱۳۹۵

طی ابلاغی از سوی دکتر سید محمدمهدی هادوی رئیس پژوهشگاه مواد و انرژی، دکتر محمدرضا رحیمی پور به عنوان رئیس جدید پژوهشکده سرامیک منصوب شد.

به گزارش روابط عمومی پژوهشگاه، دکتر هادوی در مراسم تودیع و معارفه پژوهشکده سرامیک ضمن تبریک ولادت امام رضا(ع)، از تلاش‌های دکتر



علیرضا آقایی رئیس سابق این پژوهشکده و همکاران وی قدردانی کرد و انتصاب دکتر رحیمی‌پور را تبریک گفت. در ادامه دکتر رحیمی‌پور درخصوص اهداف و برنامه‌های آتی این پژوهشکده توضیحاتی را ارائه نمود.

حضور دانشجویان بین‌المللی در پژوهشگاه مواد و انرژی

۲۹ تیر ۱۳۹۵

پژوهشگاه مواد و انرژی با توجه به سیاست‌های خود مبنی بر ورود به عرصه آموزش بین‌المللی و نیاز به تقویت این‌گونه تعاملات، اقدام به برگزاری دوره‌های کوتاه مدت تحقیقاتی به زبان انگلیسی برای دانشجویان خارجی نموده است.

به گزارش روابط بین‌الملل، دکتر نیما نادری مسئول روابط بین‌الملل پژوهشگاه با اعلام این خبر افزود: طبق تفاهم‌نامه‌ای که بین پژوهشگاه و کمیته بین‌المللی تبادل دانشجویی آیسته (IAESTE) وابسته به دانشگاه تهران منعقد شده است، دانشجویان خارجی وانند در این دوره‌های کوتاه مدت پژوهشی شرکت نمایند.

وی اظهار داشت: در حال حاضر دانشجویان خارجی از کشورهای اسلواکی، لهستان، تونس و قزاقستان در زمینه‌های لایه‌های نازک، مواد پیشرفته، الکترونیک و انرژی‌های تجدیدپذیر در پژوهشکده‌های نیمه‌هادیها، فناوری نانو،



سرامیک و انرژی مشغول به فعالیت هستند که نتایج تحقیقات این محققین به صورت مقالات علمی و محصولات دانش بنیان قابل ارائه می‌باشد.

دکتر نادری همچنین خاطر نشان کرد: پیرو حضور دانشجویان بین‌المللی، جلسات سخنرانی علمی به زبان انگلیسی هر هفته در پژوهشگاه مواد و انرژی برگزار می‌گردد.

وی هدف از برگزاری این سخنرانی‌ها را تبادل دانش، بحث و هم‌اندیشی پیرامون مسائل علمی و پژوهشی و همچنین آشنایی با پتانسیل‌های علمی کشورهای مختلف عنوان کرد.

مسئول روابط بین‌الملل با بیان اینکه دانشجویان خارجی از رشته‌های مختلف مهندسی در پروژه‌های تحقیقاتی همکاری خواهند داشت، افزود: پژوهشگاه مواد و انرژی به عنوان قطب علمی منطقه در زمینه انرژی‌های تجدید پذیر و مواد پیشرفته توانایی آموزش به پژوهشگران بین‌المللی را دارد و این‌گونه دوره‌ها می‌تواند باعث افزایش اقتدار علمی پژوهشگاه در مجامع بین‌المللی گردد.

اخبار علمی

استفاده از نانوپوشش در آگزوز «موتورسیکلت یاماها»



یاماها از نوعی نانوپوشش متخلخل برای ساخت آگزوز یکی از مدل‌های موتورسیکلت خود استفاده کرده است. این پوشش موجب محافظت آگزوز در برابر خوردگی و حرارت می‌شود. صدای زوزه موتور برای علاقه‌مندان به موتورسیکلت جذابیت دارد؛ صدایی که ممکن است برای بسیاری گوش‌خراش و ناهنجار باشد. به هر حال آگزوز و ساختار آن از جمله بخش‌های موتورسیکلت است که از نقطه نظر بصری و کارایی برای تولیدکنندگان اهمیت زیادی دارد. اخیراً شرکت یاماها بهبودهایی در این بخش از موتورسیکلت‌های خود داده است. در نمایشگاه O&S، شرکت یاماها نشان داد که به طیف استفاده‌کنندگان از فناوری نانو در ساخت موتورسیکلت پیوسته است. این شرکت از ترکیبی به نام اکسی‌نیتريد سیلیکون (SiOxNy) که نوعی ساختار آمورف متخلخل و به صورت فیلم سرامیکی است، با ضخامت نانومتری استفاده کرده است. این ماده دارای مقاومت حرارتی تا دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد بوده و از مقاومت به خوردگی بالایی نیز برخوردار است به طوری که می‌تواند در برابر نفوذ آب، کلر و اکسیژن مقاومت کند. از این رو، چنین پوششی برای حفظ رنگ‌ها نظیر آبی، طلایی و بنفش مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نانوپوشش شفاف بعد از قرار گرفتن روی سطح می‌تواند مقاومت حرارتی بالایی ایجاد کند. شرکت یاماها از اکسی‌نیتريد سیلیکون برای ساخت آگزوز در موتورسیکلت مدل MT-09 خود استفاده کرده است. در نمایشگاهی که در آلمان برگزار شده، یاماها این موتورسیکلت را برای نمایش عموم عرضه کرده است. در این نمایشگاه، شرکت‌های دیگری نیز از این ماده برای ساخت ادوات مختلف استفاده کرده‌اند. این نمایشگاه فرصت مناسبی برای معرفی این فناوری بوده و کاربردهای مختلف اکسی‌نیتريد سیلیکون به نمایش درآمده است. این نمایشگاه نشان داد که پتانسیل‌های زیادی برای استفاده از این ماده در حوزه‌های مختلف وجود دارد. در نمایشگاه O&S بیش از ۳۰۰ سازمان و شرکت از ۳۰ کشور مختلف جهان شرکت کرده‌اند. این شرکت‌ها در حوزه‌هایی نظیر پلاستیک، شیشه و فلز و همچنین پوشش و پردازش سطح با پلاسما فعالیت دارند. برخی از این فناوری‌ها قابلیت استفاده در محصولات صنعتی از خودروسازی گرفته تا ابزارهای مختلف را دارا هستند.

منبع: www.nano.ir

افزودن نانوذرات موجب افزایش هدایت گرمایی روغن موتور می‌شود



محققان مالزیایی با افزودن نانوذرات به روغن، توانستند هدایت گرمایی روانسازهای رایج در بازار را افزایش دهند. با این کار می‌توان روغن موتور ارزان‌تر با کارایی بالا نسبت به محصولات فعلی تولید کرد. یافته‌های اخیر محققان نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به روانسازها و روغن‌های مورد استفاده در خودرو موجب بهبود برخی خواص این سیالات می‌شود. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که این نانوسیالات دارای خواص روانسازی بالایی بوده و از هدایت گرمایی مناسبی برخوردارند؛ بنابراین، این محصولات می‌توانند خودرو را در برابر گرما و خستگی محافظت کنند. براساس نتایج منتشر شده، افزودن نانولوله‌های کربنی، نانوذرات سرامیکی، فلزی و اکسید فلزی می‌تواند روی بهبود کیفیت روغن‌ها و روانسازها مؤثر باشد. تا پیش از این نانولوله‌های کربنی به‌عنوان بهترین گزینه برای تولید نانوسیالات روانساز پیشنهاد می‌شدند، اما اخیراً محققان مالزیایی دریافته‌اند که گزینه دیگری نیز وجود دارد که می‌تواند رقیب جدی برای نانولوله کربنی باشد. پژوهشگران دانشگاه

ناتینگهام مالزیبا همکاری محققان دانشگاه تیلور به بررسی تأثیر افزودن نانورق‌های گرافنی به روانسازهای تجاری پرداختند. گرافن ماده‌ای ورقه‌ای شکل از جنس اتم‌های کربن است. این ماده از هدایت الکتریکی و گرمایی قابل توجهی برخوردار است. این گروه تحقیقاتی نشان دادند که افزودن تنها ۰/۰۱ درصد ورق گرافنی به روغن می‌تواند ۱۷ درصد هدایت گرمایی آن را افزایش دهد، در حالی که ویسکوزیته این روغن تقریباً هیچ تغییری نمی‌کند.

افزایش هدایت گرمایی در روان‌سازها معمولاً به ابعاد، غلظت و نرخ هدایت ورق‌های گرافنی بستگی دارد. پژوهشگران این پروژه معتقدند که بهبود خواص روغن‌ها به دلیل مساحت سطحی بالای گرافن بوده و به میزان توزیع این ماده در روغن وابسته است.

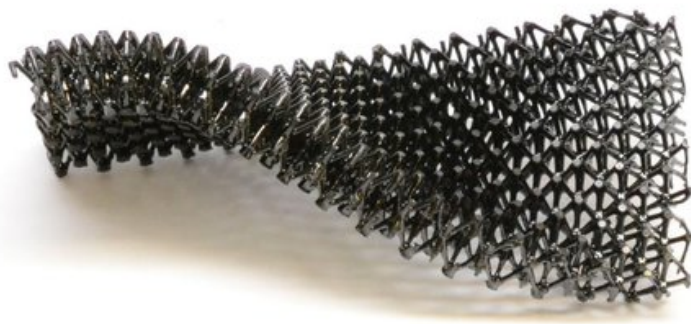
افزایش نرخ هدایت الکتریکی در یک روانساز به این معنی است که روانساز می‌تواند با سرعت بیشتری گرما را از موتور خارج کند. عبدالخلیل راشد از محققان این پروژه بسیار خوش‌بین است که این نانوروانساز بتواند ۲۰ درصد بیشتر از روغن‌های رایج دوام داشته باشد. در حال حاضر روغن‌های موتور بین ۵ هزار تا ۱۰ هزار کیلومتر کارکرد دارند. تولید این روغن می‌تواند هزینه‌ها را نیز کاهش دهد، چرا که با افزودن مقدار کمی نانوذرات، دیگر نیاز به افزودن ترکیبات دیگر به این روغن‌ها نیست. چالش فعلی محققان یافتن فرمولاسیون مناسبی منطبق با استانداردهای صنعتی است.

منبع: www.nano.ir

بهبود خواص سرامیک‌های مورد نیاز صنایع هوافضا با سبوس برنج

محققان دانشگاه صنعتی مالک اشتر با حمایت سازمان هوافضایی ایران با استفاده از سبوس برنج موفق به بهینه سازی خواص مکانیکی یک نوع سرامیک دما بالا در مقیاس آزمایشگاهی شدند.

به گزارش سرویس علمی ایسنا، مواد مرکب زمینه سرامیکی، دسته‌ای از مواد هستند که فاز دوم به آن‌ها به منظور تغییر خواص زمینه یا فاز تقویت کننده افزوده می‌شود.



در مواد مرکب، خصوصیات زمینه و فاز تقویت کننده با هم ترکیب می‌شود تا خواص جدید و متفاوتی ایجاد کند. سرامیک‌های مهندسی دما بالا به آن دسته از سرامیک‌ها گفته می‌شود که قابلیت استفاده در دمای متوسط تادماهای بالا، (بیش از ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) تنش‌های کم تا زیاد و محیط‌های به شدت اکسید کننده و خوردنده را داشته باشند.

در این میان، آن دسته از سرامیک‌هایی که دمای ذوب بیش از ۳ هزار درجه سانتی‌گراد داشته باشند، به عنوان سرامیک‌های فوق دما بالا شناخته می‌شوند.

در این راستا محققان دانشگاه صنعتی مالک اشتر با حمایت سازمان هوافضایی طرح تحقیقاتی را در این زمینه اجرایی کردند. مهندس بلال جاهد مجری طرح با اشاره به خواص مناسب حرارتی و مکانیکی دی بورید زیرکونیوم به بیان اهداف دنبال شده در این طرح پرداخت و گفت: دی بورید زیرکونیوم خواص مناسبی از نظر حرارتی، مکانیکی و نقطه ذوب دارد ضمن آن که این ماده سرامیکی از استحکام حرارتی و مقاومت بالا در برابر محیط‌های خوردنده برخوردار است.

وی بر این اساس دی بورید زیرکونیوم را ماده مناسبی برای بسیاری از کاربردهای سازه‌ای دما بالا توصیف کرد و ادامه داد: یکی از معایب این ماده که کاربرد آن‌ها را با محدودیت مواجه کرده است، پایین بودن استحکام و چقرمگی شکست آن است که در این پژوهش سعی شده است با افزودن یک فاز ثانویه مناسب، این خصوصیات بهبود داده شود.

این محقق ادامه داد: با توجه به اینکه فاز ثانویه این سرامیک کامپوزیتی، یعنی نانو ویسکر و نانو ذرات کاربید سیلیکون از سبوس برنج گرفته شده است، بنابراین تولید این سرامیک مهندسی با هزینه و آلودگی زیست محیطی کمتر انجام خواهد شد. علاوه بر آن افزودن نانو ویسکرهای کاربید سیلیکون موجب بهبود چقرمگی و استحکام شکست این سرامیک پر کاربرد می‌شود.

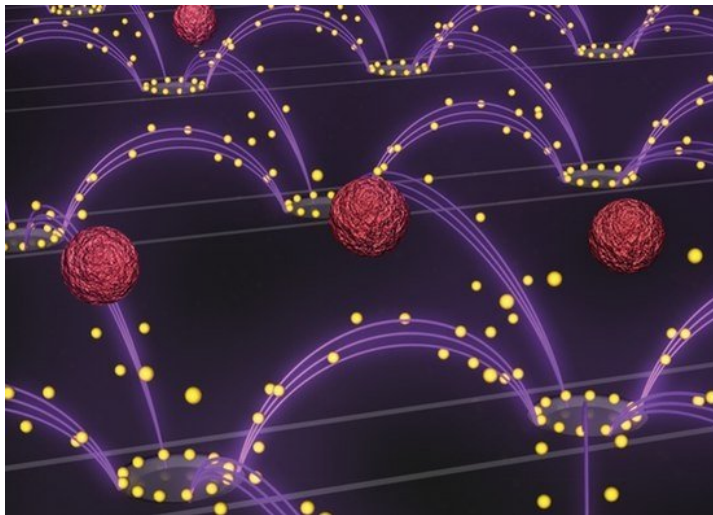
جاهد، به بیان مراحل انجام این طرح پرداخت و یادآور شد: در مرحله اول نانو ویسکر و نانوذرات از سبوس برنج سنتز شده و سپس سنتز آن‌ها توسط آزمون‌های XRD و XRF و همچنین میکروسکوپ الکترونی بررسی و تأیید شد.

مجری طرح با بیان این که در مرحله بعد نانو ویسکر و نانو ذرات با درصدهای متفاوت به زمینه بورید زیرکونیوم اضافه شد، یادآور شد: نانو کامپوزیت تولید شده پرس و پیرولیز و زینتر شد و در نهایت خواص قطعات تولید شده از نانو کامپوزیت حاصل، از جمله دانسیته نسبی، سختی ویسکر (ویکرز) و چقرمگی شکست، مورد ارزیابی قرار گرفت. به گفته وی این نوع سرامیک‌ها در صنایع حساسی مانند هوافضا و دفاع کاربرد گسترده دارند.

این طرح در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد بلال جاهد و با راهنمایی دکتر مهری مشهدی از دانشگاه دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران و با همکاری سازمان هوا فضایی ایران انجام شد و این پایان‌نامه تحت عنوان پایان‌نامه مورد نیاز صنعت به تأیید داوران ستاد ویژه توسعه فناوری نانو نیز رسیده است.

منبع: <http://www.isna.ir/news/95031715429>

تبدیل حرارت تلف‌شده به برق به کمک نانوساختارهای قفس مانند



محققان دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی با همکاری پژوهشگران اتریشی، سوئیسی و آلمانی مواد نانوساختاری را تولید کردند که می‌توان با استفاده از آن‌ها حرارت تلف شده در بخش‌های مختلف صنایع را با بازدهی بالا به الکتریسیته تبدیل کرد.

به گزارش ایسنا، ماده ترموالکتریک قطعه جامدی است که انرژی گرمایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. برخلاف ماشین‌های گرمایی رایج که دارای اجزای متحرکی هستند، مواد ترموالکتریک هیچ قسمت متحرکی ندارد و کاملاً بی‌صدا عمل می‌کند.

این مولدهای برق به مدت ۳۰ سال بدون نیاز به نگهداری و تعمیر در کاوش‌های طولانی فضایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ترموالکتریک‌ها در مقایسه با ماشین‌های گرمایی رایج بازدهی کمتری دارند، اما برای کاربردهای کوچک که توان الکتریکی بالایی مورد نیاز نیست، می‌تواند مفید باشد.

در سال‌های اخیر تلاش‌هایی در زمینه افزایش بازدهی تبدیل انرژی این مواد صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به طرح تحقیقاتی محققان دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اشاره کرد.

دکتر اشکان ذوالریاستین از محققان این طرح با اشاره به ساختارهای قفس مانند در رابطه با اهداف دنبال شده در این طرح گفت: هدف از انجام این طرح توسعه مواد ترموالکتریکی دارای هدایت حرارتی پایین و هدایت الکتریکی بالا بوده است. ترکیبات با ساختار قفسی شکل به دلیل ریزساختار منحصر به فردشان می‌توانند این خاصیت را برای ما ایجاد کنند.

وی اضافه کرد: علاوه بر آن افزودن نانو ذرات به این ساختارها و ایجاد ریزساختار نانوکامپوزیتی می‌تواند این خاصیت را ارتقا بخشد.

ذوالریاستین با تأکید بر این که در این طرح به کمک این نانوساختارهای کامپوزیتی می‌توان هزینه‌های مربوط به اتلاف انرژی حرارتی را تا حد زیادی کاهش داد، یادآور شد: به علاوه با تبدیل حرارت اتلافی به برق می‌توان تا حدودی از مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی هوا نیز جلوگیری کرد.

این محقق ساختار اتمی مواد قفسی شکل را تشریح کرد و در خصوص سازوکار رفتار ترموالکتریک این ساختارها توضیح داد:

ساختار اتمی این ترکیبات به گونه‌ای است که اتم‌ها چارچوبی قفس مانند را برای یک اتم سنگین ایجاد می‌کند. انتقال حرارت درون این ماده و عبور فنون‌ها و الکترون‌ها، اتم سنگین حبس شده درون قفس اتمی را به لرزه در می‌آورد و این موضوع کاهش انتقال حرارت و افزایش خواص ترموالکتریک را به دنبال دارد.

به گفته وی کاهش ابعاد این قفس‌ها و یا ایجاد ساختار نانو کامپوزیتی منجر به افزایش چشم‌گیر خاصیت ترموالکتریک این ترکیبات می‌شود.

محقق این طرح ادامه داد: در طرح حاضر ترکیبات با ساختار قفس مانند با اتم حبس شده باریوم در قفس ایجاد شده با اتم‌های سیلیسیوم یا ژرمانیوم به صورت نانو کریستال، نانوسیم و نانو کامپوزیت حاوی نانوذرات سرامیکی یوروپیم تیتانات و کاربرد سیلیسیوم با روش‌های مختلف سنتز شده‌اند.

وی فرایندهای مورد استفاده جهت سنتز این ترکیبات آلیاژسازی مکانیکی را پرس گرم، ریسندگی مذاب، پلاسمای جرقه‌ای و پرتو یونی متمرکز شده ذکر کرد و گفت: تأثیر پارامترهای فرایند بر روی اندازه، ریزساختار، خواص فیزیکی و خاصیت ترموالکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است.

وی خاطر نشان کرد: این نانوساختارهای آزمایشگاهی را می‌توان در نیروگاه‌های حرارتی تولید برق، آگزوز خودروها و مبدل‌های حرارتی ترکیبی به کار گرفت.

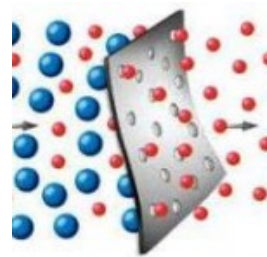
این تحقیقات حاصل تلاش‌های دکتر اشکان ذوالریاستین محقق پسادکترای دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی و پژوهشگرانی از کشورهای اتریش، آلمان و سوئیس است. نتایج این کار در مجله Physica Status Solidi منتشر شد.

منبع: <http://www.isna.ir/news/9504>

دانشگاه صنعتی امیرکبیر: جداسازی بهینه‌ی گازها به کمک غشاهای نانو کامپوزیتی

محققان دانشگاه صنعتی امیرکبیر در پژوهش آزمایشگاهی خود به یک غشای نانو کامپوزیتی دست یافتند که با می‌توان مخلوط گازها را جداسازی کرد.

فرایند جداسازی گازها کاربردهای زیادی در صنایع نفت و گاز و پزشکی دارد. فرایند جداسازی گازی به روش‌هایی گفته می‌شود که به‌وسیله‌ی آن‌ها مخلوط چند گاز از هم جدا می‌شوند که محصول نهایی این فرایند می‌تواند چند گاز و یا یک گاز با خلوص بالا باشد. روش‌های متفاوتی به‌منظور اعمال فرایند جداسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های پرکاربرد، استفاده از



غشاهای مصنوعی است. این غشاها معمولاً از پلیمر و سرامیک‌ها ساخته می‌شوند. بهینه کردن عملکرد غشاها جهت بهبود فرایند جداسازی گاز یکی از اولویت‌های تحقیقاتی در این حوزه از علم به شمار می‌رود. دکتر احمدرضا رئیسی هدف اصلی این پژوهش را ساخت غشای پلیمری جهت جداسازی گازهای دی‌اکسید کربن/نیتروژن و اکسیژن / نیتروژن عنوان کرد.

وی افزود: «استفاده از غشای نانو کامپوزیتی ساخته شده در این طرح جهت جداسازی گاز، موجب افزایش بازدهی فرایند و همچنین کاهش هزینه‌ی فرایند جداسازی گاز خواهد شد.»

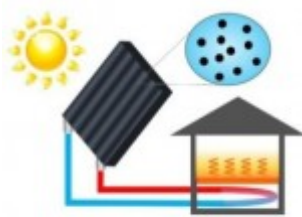
غشای ساخته شده در این طرح متشکل از پلی اترسولفون/پلی(اتر-بلوک-آمید) بوده است که ذرات زئولیت در مقیاس میکرو و نانو به ماتریس پلیمری افزوده شده است. افزوده شدن نانوذرات زئولیت بهبود عملکرد جداسازی گازی غشاء نسبت به حضور میکروذرات را در پی داشته است. در این غشاء، پلی اترسولفون نقش لایه‌ی نگه‌دارنده و (پلی اتر-بلوک-آمید) به‌عنوان لایه‌ی گزینش گر عمل می‌کند. رئیسی در رابطه با مراحل ساخت این غشا گفت: «در مرحله‌ی اول مواد پلیمری و نانوذرات زئولیت هر یک به‌صورت جداگانه سنتز شدند. بدین‌صورت که نانوذرات زئولیت NaX از مواد با ترکیب هیدروکسید سدیم، آلومینات سدیم/سیلیکا/ آب سنتز شد. همچنین لایه‌ی نگه‌دارنده‌ی پلی اترسولفون با استفاده از روش تغییر فاز و به‌وسیله‌ی غوطه‌وری و لایه‌ی گزینش گر پلی اتر بلوک آمید یک بار به‌صورت خالص و یک بار حاوی نانوذرات زئولیت با روش تبخیر حلال سنتز شد. در ادامه غشا ساخته شده و عملکرد آن در جداسازی گازها مورد ارزیابی قرار گرفت.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، عملکرد گزینش‌گری غشا حاوی نانوذرات زئولیت جهت جداسازی گاز دی‌اکسید کربن/نیتروژن از

۴۲/۰۳ به ۹۸ درصد و جداسازی اکسیژن/نیتروژن از ۰۳/۳ به ۷۶/۷ بهبود یافته است. این تحقیقات حاصل تلاش‌های دکتر احمدرضا رئیسی و دکتر عبدالرضا اروجعیان - اعضای هیأت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر - و کیومرث زرشناس - دانش‌آموخته‌ی مقطع کارشناسی این دانشگاه - است. نتایج این کار در مجله‌ی Journal of Membrane Science (جلد 510، سال ۲۰۱۶، صفحات ۲۷۰ تا ۲۸۳) به چاپ رسیده است.

منبع: www.nano.ir

نانوذراتی که نور خورشید را با کارایی ۹۰ درصد به گرما تبدیل می‌کند



محققان ژاپنی نانوذرات نیتريد تیتانیوم ساختند که در صورت وارد شدن در آب می‌تواند با کارایی ۹۰ درصد نور خورشید را به گرما تبدیل کند.

یک گروه تحقیقاتی از ژاپن با انجام تحقیقاتی نشان دادند که نانوذرات فلزات انتقالی که به صورت نیتريد و کاربرد باشند قادر به جذب نور خورشید خواهند بود. محققان این پروژه برای اثبات یافته‌های خود، این نانوذرات را به آب افزوده و نشان دادند که به سرعت دمای آب افزایش می‌یابد. ساتوشی ایشی و تاداکی ناگاو از گروه نانوسیستم‌های فتونیک مؤسسه نانومعماری مواد ژاپن (MANA) نشان دادند که افزودن نانوذرات کاربیدی و نیتريدی فلزات

انتقالی می‌تواند به سرعت دمای آب را افزایش دهد. نور خورشید از منابع مهم برای تأمین انرژی است. معمولاً از نور خورشید برای گرم کردن آب و سپس از آن برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شود. میزان تبدیل نور به گرما یکی از عوامل مهم در این فرآیند است. نیمی از مصرف انرژی در منازل صرف گرم کردن آب و هوا می‌شود. اگر بتوان روشی برای استفاده از نور خورشید برای این کار ارائه کرد، می‌توان بدون نیاز به الکتریسیته، آب یا هوا را گرم کرد با این کار میزان نشر دی اکسید کربن کاهش می‌یابد. در این پروژه محققان به صورت مستقیم نانوذرات را وارد آب کردند تا جذب نور خورشید توسط آب را به حداکثر برسانند. ناتو لومزاوا و همکارانش محاسباتی انجام دادند که بهترین مواد را برای تولید نانوذرات به منظور استفاده در آب معرفی کنند. آن‌ها به دنبال ترکیبی بودند که بتواند با کارایی بالا تبدیل انرژی را انجام دهد. نتایج یافته‌های آن‌ها نشان داد، کاربیدها و نیتريدی فلزات انتقالی می‌تواند بهترین گزینه برای این کار باشد. این ترکیبات سرامیکی جاذب‌های بسیار مناسبی هستند. این گروه نیتريد تیتانیوم را انتخاب و آن را در آب غوطه‌ور کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این نانوذرات با کارایی ۹۰ درصد می‌توانند انرژی را تبدیل کنند. از آنجایی که رزونانس پلاسمونی در سطح این ذرات اتفاق می‌افتد، فرآیند جذب نور با کارایی بالاتری نسبت به نانوذرات طلا و کربن اتفاق می‌افتد.

این گروه قصد دارند از این روش برای گرم کردن زمین، آب و پساب‌ها استفاده کنند. برای این کار از مواد هیبریدی حاوی پلیمر و نانوذرات استفاده می‌شود.

منبع: www.nano.ir

مصاحبه

مهندس فرزاد معصومی
مدیر عامل شرکت کاشی مرجان



لطفاً مختصری از بیوگرافی خود را جهت آشنایی خوانندگان بفرمایید.

فرزاد معصومی هشتم متولد ۱۳۳۱/۱/۳۱ در اصفهان - فارغ التحصیل رشته زمین شناسی در سال ۱۳۵۳ از دانشگاه اصفهان - شروع فعالیت کاری و اشتغال خود را بلافاصله پس از خدمت سربازی در ابتدای سال ۱۳۵۶ در کاشی اصفهان آغاز نمودم و مدت ۱۴ سال در این کارخانه مشغول به کار بودم و سپس در خردادماه سال ۱۳۷۰ به کاشی مرجان آمدم و به لطف خداوند بزرگ ۲۵ سال است که در کاشی مرجان انجام وظیفه می‌نمایم. بنابراین طی ۳۹ سالی که به کار اشتغال دارم تماماً در صنعت کاشی و سرامیک بوده و حتی یک روز از این صنعت فاصله نگرفته‌ام.

جایگاه علم سرامیک در کشور ایران را چگونه ارزیابی می‌کنید و آیا شرایط برای پیشرفت در این رشته را مثبت ارزیابی می‌کنید؟

جدا از وضعیت کنونی صنعت سرامیک و رکود فعلی آن، علم سرامیک در ایران با توجه به استعدادهای موجود چه از دیدگاه مواد اولیه معدنی قابل دسترس و نیروهای دلسوز و متخصص و در اختیار داشتن مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی متعدد از جایگاه مطلوبی برخوردار می‌باشد و حتی شرایط برای پیشرفت آن در صورتی که بستر سازی مناسبی برای آن در نظر گرفته شود وجود دارد.

آیا تعداد دانشجویان و دانشگاه‌هایی که در این رشته فعالیت می‌کنند با توجه به گستردگی این رشته کفایت؟
با توجه به گستردگی این صنعت و یادآوری این مطلب که صنعت سرامیک به کاشی سازی محدود نمی‌شود نظر من نیز به افزایش مراکز آموزشی علمی و مجهزتر و کاربردی‌تر و هم افزایش دانشجویان این رشته، مثبت می‌باشد.

واحد‌های درسی که در این رشته ارائه می‌شود تا چه حد نیازهای موجود در این صنعت را پاسخ می‌دهد؟
طی این مدت طولانی که در این صنعت کار کرده‌ام و با فارغ‌التحصیلان زیادی سرکار داشته‌ام، متأسفانه واحدهای درسی دانشگاهی را خیلی کاربردی برای شروع به کار و خصوصاً انتظاری که کارخانجات از مهندسين سرامیک برای رفع نیازهای سرامیکی خود دارند همسو نمی‌باشد.

برای اینکه فارغ‌التحصیلانی که وارد بازار می‌شوند برای بازار کار مفید باشند و بهره‌وری لازم را داشته باشند چه پیشنهادهایی دارید؟ توصیه شما به کارشناسانی که اخیراً از دانشگاه فارغ‌التحصیل شده‌اند، چیست؟

ببینید در ادامه پاسخ به سوال بالا به نظر من اگر دانشجویی قصد ادامه تحصیل و یا تدریس داشته باشد واحدهای درسی موجود کافی است. اما اگر قصد استخدام در صنعت را داشته باشند مطالب درسی آموزش داده شده کاربردی نبوده و حداقل نیاز به یک تا دو سال کارآموزی و آموزش در کارخانه و درجوار افراد با تجربه، حتی آنانی که با مدارک پایین‌تر اما تجارب طولانی‌تر دارند، است. اما پذیرش این قضیه برای هر دو طرف مشکل می‌باشد. به عبارت دیگر برای یک مهندس سرامیک سخت است که یک نفر

دیپلم به او آموزش دهد و برای دیپلمه‌ای که سال‌هاست در کارخانه اپراتوری می‌کند نیز قابل تحمل نیست که به مهندس تازه وارد آموزش دهد چرا که بوضوح می‌داند او فردا رئیس مستقیمش خواهد شد. بنابراین این آشنایی و کارآموزی بایستی در دوران تحصیل انجام شده باشد.

با تجربه‌ای که در این سال‌ها بدست آورده‌ام، بنظر من ماهیت رشته سرامیک در دانشگاه و نحوه تدریس بایستی کلا عوض شود، سرامیک از جمله صناعی است که پیدا کردن تخصص در آن با تجربه در کارخانه و تولید بدست می‌آید نه گذراندن واحدهای درسی دانشگاهی که در ترم بعد همه از یاد دانشجو رفته است. پیشنهاد من این است که دانشجویان این رشته یکسال یا دو سال واحدهای درسی کاربردی را پاس کنند سپس یک یا دو ترم به کارخانجات بیایند و حتی می‌توان برای این مدت چند واحد کارآموزی در نظر گرفت و دوباره به دانشگاه برگردند و حتی ترم‌های آخر دوباره این سیکل تکرار شود. اینکه دانشجویان یک تا دو ماه پروژه خود را که اکثراً تحقیقاتی و برای صنایع سرامیک در آن لحظات کاربردی نیست را آن‌هم در تابستان گذرانیده و قصه تمام شود کافی نیست. رشته سرامیک بایستی همانند مراکز حرفه‌ای وزارت کار، تحصیل با کار در صنعت ادغام شود مثل کاری که هم اکنون در دانشگاه Faenza ایتالیا که بزرگترین مرکز دانشگاهی ایتالیاست انجام می‌شود. وضعیت امروز یعنی ارتباط دانشگاه با صنعت بیشتر در حد شعار است تا عمل.

بنابراین توصیه من به دانشجویان رشته سرامیک این است که بپذیرند و این تحمل را داشته باشند که در بدو استخدام نیازمند کارآموزی در سخت‌ترین بخش‌های کارخانجات این صنعت حتی در پایین‌ترین رده شغلی هستند. مدتی را مشغول به کار شوند و از این آموزش هیچ ترس یا احساس سبک شدن و خرد شدن شخصیت به خود را ندهند.

ببخشید پاسخ این سوال طولانی شد اما دلم می‌خواهد تجربیات چهل سال گذشته خود را برای این عزیزان بازگو کنم. اگر من ۲۵ سال است مدیرعامل کاشی مرجان هستم، یک شبه به این شغل نرسیده‌ام، ۱۴ سال قبل از آن کار خود را با اپراتوری و شاگردی در کاشی اصفهان در کنار چند مهندس سرامیک فرانسوی در سال ۱۳۵۶ آغاز کردم. آن زمان همکلاسی‌ام که با هم مشغول کار شدیم به من می‌گفت این‌ها دارند از تو کار می‌کشند و خودشان مدیریت می‌کنند، همین شد که او را اخراج کردند و چون شاگرد اول رشته شیمی دانشگاه اصفهان بود در هنرستان سرامیک مشغول بکار شد و ۳۰ سال فقط تدریس کرد حالا هم بازنشسته و بی‌کار است. یک روز به کاشی مرجان نزد من آمد، خاکی را برای فروش آورده بود، گفتم حالا من نوکری می‌کنم یا تو، قبول کرد که تفکر اشتباه او در جوانی و بلند پروازیش که می‌خواست از راه نرسیده رئیس آزمایشگاه شود، او را از مسیر پیشرفت دور ساخت. اکنون برخی از جوانان و فارغ‌التحصیلان ما چنین طرز فکری دارند.

باور کنید حتی موردی را در مصاحبه داشته‌ام که سؤال می‌کرد نمی‌شود در دفتر مرکزی شما کار کنیم حتی اگر مربوط به رشته تحصیلی‌ام نباشد، علت را پرسیدم، جواب این عزیز این بود که آخه کارخانجات راهش دور است، شیفتی است، پوست من به گرد و خاک و گل حساسیت دارد. این تفکر نشان می‌دهد که او اصلاً از اول راه را اشتباه رفته و برای این کار ساخته نشده است. به شوخی به او گفتم صبر کن من در حال احداث کارخانه تولید اقلام بهداشتی پوست صورت، واقع در قلب چهارباغ اصفهان هستم، حتماً از وجود شما برای مدیریت آن استفاده خواهم کرد!!! امید است این خاطره واقعی باعث آزردن خاطر شدن عزیزانی که به جای فرزندان من هستند نشود، اما بپذیرید به قول قدیمی‌ها "نردبان پله، پله" و مسیری که یک شبه طی شود مسلماً پایدار نخواهد بود.

با توجه به اینکه شما یکی از افراد موفق در بخش صنعت سرامیک هستید، بفرمایید که چگونه وارد صنعت شدید و شما و شرکت شما هم اکنون در چه وضعیتی قرار دارید؟

شرایط اشتغال به کار من در آن سال‌ها با امروز قابل مقایسه نیست. من در ابتدای سال ۱۳۵۶ (قبل از انقلاب) و در شرایطی که هنوز آخرین روزهای خدمت سربازی را می‌گذراندم به کاشی اصفهان که در شرف راه‌اندازی بود رفتم، این کارخانه با نظارت فرانسوی‌ها و کارخانه سرباطی فرانسه قرارداد دانش فنی و راه‌اندازی داشت. چون به زبان انگلیسی تسلط داشتم با یک مصاحبه کوتاه درخواست کردند که از همین فردا پیش ما بیا و ما یک نفر زمین شناس را برای کنترل مواد اولیه نیاز داریم. باور بفرمایید دست مرا گرفت و برد پیش رئیس کارخانه که او هم آلمانی بود و گفت این آقا بایستی از فردا در کاشی اصفهان و در آزمایشگاه مشغول بکار شود. که آخرین روز سربازی من مواجه با اولین روز استخدام در کاشی اصفهان شد حتی بدون یک روز فاصله.

و سپس دوره‌های مختلفی را در اکثر کارخانجات لعاب سازی، رنگ سازی، شابلون سازی، مواد واسطه‌ایی (چون در آن زمان به جز خاک‌های معدنی همه چیز وارداتی بود) در ایتالیا، آلمان، سوئیس، هلند و اسپانیا گذراندم. و کم کم بعنوان یک متخصص

سرامیک پله‌های ترقی را روز به روز طی نمودم.

به لطف خداوند بزرگ ۲۵ سال است مدیر عامل کاشی مرجان هستم و این کارخانه علی‌رغم وضعیت رکود و نابسامانی بازار امروز یکی از برندهای معروف کاشی در ایران می‌باشد.

برای بهبود شرایط صنعت سرامیک چه پیشنهادهایی دارید؟

متأسفانه هم متولیان امر (وزارت صنایع از جهت صدور مجوزهای بی رویه بدون مطالعه انتهای خط) و هم صاحبان این صنعت درجهت راه‌اندازی کارخانجات متعدد کاشی سازی خصوصاً در منطقه یزد بدون در نظر گرفتن نیاز مملکت به این صنعت و وضعیت صادرات، و متأسفانه رقابت‌های ناسالم و محصولات بی کیفیت، فقط منجر به بالا بردن تولید این صنعت شده است که اکنون با توجه به رکود صنعت ساختمان و بالا بودن دپوی بی حد و اندازه کارخانجات کاشی، وضعیت نابسامانی در پیش روست. اما به هر حال برای بهبود شرایط، رو آوردن به اولاً افزایش کیفیت به جای کمیت و نوآوری در محصولات و تولید کردن محصولی که دیگران تولید نکرده‌اند و دست برداشتن از این شعار اولین بودن در فلان ... محصول و دوما پیدا کردن بازارهای جدید صادراتی جدا از عراق می‌تواند راه‌گشا باشد. گرچه به نظر من صادرات به عراق این چند ساله به‌هرحال مشکل بزرگی را برای فروش محصولات کارخانجات از پیش رو برداشت و اگر نبود این کشور و صادرات آن و این صنعت زودتر از این‌ها به بن بست رسیده بود. اما از طرفی هم برخی از آب گل‌آلود ماهی گرفته و هر محصول بی کیفیت را با نازل‌ترین قیمت به این کشور صادر نمودند. اما اکنون زمان دست برداشتن از این تفکر و رو آوردن به تولیدات با کیفیت و صادر کردن به کشورهای خواهان محصول خوب با قیمت مناسب و معقول تر فرا رسیده است.

رکود بازار تولید در چه بخشی از صنعت سرامیک نهفته است و راه حل مقابله با آن چیست؟

من فکر می‌کنم وقتی صنعت ساختمان کشور دچار رکود می‌شود و کارخانجات سیمان کشور با کاهش تولید و توقف همراه می‌گردند سایر صنایع وابسته به این صنعت نیز دچار رکود می‌شوند. بنابراین تا کار بصورت ریشه‌ای حل نشود پرداختن به تقویت شاخ و برگ‌ها راه چاره نیست.

البته بی‌انصافی نشود رکود صنعت و بازار اکنون مربوط تنها به ایران نیست، اکنون دنیا با این مشکل روبروست و بزرگ‌ترین صنایع کشورهای صنعتی دنیا مدت‌هاست رشدی نداشته و منتظر آینده‌ای روشن تر هستند و فقط چینی‌ها از این بازار آشفته حداکثر استفاده را برده و بار خود را بسته‌اند.

مشکلات صاحبان صنایع خصوصی سرامیک چیست؟

صنایع خصوصی مانند نهال‌های تازه رشد کرده هستند که هنوز ریشه محکمی در زمین ندارند تا در مقابل بحران‌ها بتوانند روی پای خود ایستاده و مقاومت کنند. صاحبان صنایع خصوصی که جان و مال خود را برای صنعت خود فدا کرده‌اند و بهترین روزهای عمر خود را برای تولید و اشتغال بکار جوانان، خالصانه صرف کرده‌اند نیاز به حمایت دارند. نقدینگی بزرگترین مشکل صنایع خصوصی است. بهره‌های بانکی علی‌رغم شعارهای موجود کمر صنایع خصوصی را شکسته است. واردات بی رویه آن‌هم از کانال‌های غیرقانونی و قاچاق از یک طرف، بالا رفتن هزینه‌های تولید از طرف دیگر، رکود در فروش و بالا رفتن موجودی‌های انبار باعث گردیده صنایع کوچک و خصوصی نفس‌های آخر را بزنند و بیش از این قادر به مقاومت نیستند و این مشکلات در حالی رو به افزایش است که متأسفانه واحدهای تولیدی با کیفیت ضربه بیشتری از واحد بزرگتر که فقط به فکر کمیت و تولید محصولات بی کیفیت و ارزان فروشی بودند خوردند.

در خصوص صنایع سرامیک به خصوص کاشی، لعاب، رنگ و سرامیک در ایران و مقایسه آن با وضعیت منطقه و جهان چه نظری دارید؟

طبیعی است وقتی کارخانجات کاشی و سرامیک با حداقل ظرفیت کار می‌کنند صنایع وابسته به آن‌ها که بایستی مواد اولیه آن‌ها را تامین کنند با کاهش ظرفیت و عملاً توقف تولید مواجه شده اند خصوصاً افزایش هزینه‌های تولید، گران شدن مواد اولیه وارداتی و داخلی، تعدد و رشد بی رویه تولید کنندگان لعاب و رنگ و رقابت سرسختانه تولید کنندگان منطقه خصوصاً چینی‌ها وضعیت آن‌ها را به خطر انداخته و به تدریج آن‌ها نیز در حال تعطیلی کارخانجات خود و بیکار شدن کارگزارانشان شده‌اند.

نقش مطبوعات تخصصی در اطلاع‌رسانی صنعت مربوط را چگونه ارزیابی می‌کنید؟ چه باید کرد که آن‌ها بالنده‌تر و پرمحتواتر شوند؟

مجلات تخصصی و نشریه‌های سرامیکی به نظر من در این چند ساله بسیار خوب عمل کرده‌اند هم رشد مطلوبی داشته‌اند. مطالب تخصصی، ترجمه‌ها، همفکری و همکاری اساتید و نخبگان این صنعت باعث رشد قابل توجه این مجلات و مطبوعات شده‌اند، آمارها و اخبار آنان کاملاً به روز و مفید می‌باشد. هر چقدر بتوانیم به آن‌ها آمار صحیح‌تر و واقعی‌تر بدهیم، پرمحتواتر و بالنده‌تر خواهند شد.

آینده صنعت سرامیک ایران را چگونه می‌بینید؟ اگر دوباره به گذشته بازگردید آیا همین راه و همین زمینه تخصصی را برای خود انتخاب می‌کنید؟

حقیقتاً من آدم خیلی بدبینی نیستم و امیدوارم روزی نزدیک فرا رسد و رشد و شکوفایی گذشته به این صنعت باز گردد. اما در مورد خودم و علاقه وافری که به این صنعت دارم و بیش از ۲/۳ عمر خود را در این رشته گذرانیده‌ام، مطمئناً در صورت شروع مجدد راهی جز این صنعت را در پیش نخواهم گرفت.

از خاطرات دوران تحصیل دانشجویی، همکلاسی‌ها و اساتید خود بفرمایید.

خاطرات دوران تحصیل به زمان‌های خیلی دور باز می‌گردد یعنی ۴۵ سال پیش و بیاد آوری همه آن‌ها دور از ذهن می‌باشد. به نظر من دوران دانشجویی جذاب‌ترین و شاداب‌ترین دوران زندگی هر تحصیل کرده دانشگاهی است اما افسوس که همه وقتی در کوران این دوران هستند عجله دارند زودتر تمام شود.

از تعداد انگشت شماری همکلاسی‌های دانشگاهی‌ام خبر دارم که اکثراً مشاغل خوب و پر مسئولیتی را بدست داشتند اما چون اکثراً شغل دولتی داشتند اکنون بازنشسته شده و از آن‌ها بی‌خبرم. البته خود من اکنون ۶۴ ساله‌ام و از نظر قوانین کار سال‌هاست بازنشسته شده‌ام، اما چون سهامدار کاشی مرجان هستم بازنشستگی برای کسی که خودش کارفرماست معنی ندارد و محکوم به کار و فعالیت تا آخرین لحظه عمر خواهد بود.

از اساتید دانشگاهی‌ام چند نفرشان به رحمت خدا رفته‌اند و یکی دونفرشان پس از بازنشستگی اکنون در شرکت‌های خصوصی فعال هستند. اما جا دارد این‌جا یادی کنم از عزیزترین استادم مرحوم دکتر جعفریان پدر استاد فسیل شناسی در ایران که از خود با ارزش‌ترین موزه فسیل و سنگ شناسی را در اصفهان به یادگار گذاشت.

انجمن سرامیک ایران را چگونه ارزیابی می‌کنید؟ لطفاً پیشنهادهای خود را برای رشد این انجمن بفرمایید؟

انجمن سرامیک ایران یک نهاد کاملاً علمی و تخصصی است که در بین سایر انجمن‌های این صنعت فعالیت دارد. پدر صنعت سرامیک ایران، استاد گرامی جناب دکتر مارقوسیان پایه گذار این انجمن بوده و همکاران ایشان همچون دکتر گلستانی‌فرد و سایرین سال‌هاست بدون هیچ چشم داشتی در این انجمن فعالیت دارند که به نوبه خود از همه این عزیزان تشکر و قدردانی دارم. این انجمن یکی از تشکل‌های علمی و پایدار این صنعت بوده که در این چند ساله خارج از هر فرقه و گروه سیاسی فعالیت داشته است. سمینارهای علمی و بین‌المللی که تاکنون اجرا کرده بی‌نظیر بوده و بزرگ‌ترین راهی که می‌توان به این انجمن کمک کرد حمایت همه جانبه و در اختیار گذاردن اطلاعات و آمارهای صحیح از وضعیت تولید و امور سرامیکی انجام گرفته در مراکز آزمایشگاهی کارخانجات می‌باشد.

فرصت را غنیمت شمرده یادی کنم از مرحوم دکتر حمید جزایری یکی از پایه‌گذاران این انجمن و این صنعت که در انجام فریضه حج، دار فانی را وداع گفت و همچنین دوست قدیمی و برادر عزیزم دکتر یوسفی که در جوار صنعتی که سال‌هاست مشغول هستند، با این انجمن همکاری همه جانبه دارند.

با تشکر از وقتی که برای این مصاحبه اختصاص دادید، چنانچه مطلب ناگفته‌ای به نظرتان می‌رسد، بفرمایید.

در پایان برای شما نیز که پس از ۴۰ سال خدمت به سراغ این حقیر آمدید آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.



دکتر علی مهری‌زاد، نویسنده
مسئول مقاله، عضو هیات علمی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد
تبریز

بررسی جذب سطحی ۴ کلرو ۲ نیترو فنل از محلول‌های آبی بر روی بنتونیت عامل‌دار

علی مهری‌زاد^{۱*}، پروین غربانی^۲

^۱ گروه شیمی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز
^۲ گروه شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر

چکیده: در این تحقیق از جاذب طبیعی و ارزان قیمت بنتونیت در حذف ترکیب ۴-کلرو-۲-نیترو فنل از محلول‌های آبی استفاده شد. ابتدا بنتونیت ساده و عامل‌دار شده با سورفکتانت‌های تترابوتیل آمونیوم پدید و ستیل تری متیل آمونیوم برمی‌د تهیه شد و سپس جذب سطحی ۴-کلرو-۲-نیترو فنل بر روی آن‌ها بررسی شد. مطالعه طیف‌های تبدیل فوریه زیر قرمز (FT-IR) جاذب‌های تهیه شده نشان داد که عامل‌دار شدن بنتونیت با هر دو نوع سورفکتانت به خوبی صورت گرفته است. ارزیابی اثر پارامترهای مؤثر بر فرآیند جذب سطحی نشان داد که عامل‌دار کردن سطح بنتونیت نقش بسزایی در افزایش میزان جذب سطحی دارد که دلیل آن را به افزایش میزان برهمکنش‌های مولکولی بین جاذب و جذب شونده می‌توان نسبت داد. نتایج نشان داد که سرعت جذب سطحی توسط هر سه نوع جاذب در لحظات اولیه سریع بوده و پس از گذشت زمان اندکی (حدود ۱۵ دقیقه) لحظه تعادل فرا می‌رسد. همچنین مشخص شد که با افزایش مقدار جاذب و کاهش غلظت اولیه جذب شونده و در محیط‌های اسیدی و خنثی حداکثر راندمان جذب سطحی رخ می‌دهد. بررسی مدل‌های غیرخطی ایزوترم‌های جذب سطحی نشان داد که داده‌ها برای هر سه نوع جاذب به خوبی از مدل فروندلیچ تبعیت می‌کنند.

کلمات کلیدی: ۴-کلرو-۲-نیترو فنل، بنتونیت، جذب سطحی، ایزوترم

۱- مقدمه

فنل و مشتقات آن از جمله مواد اولیه تولید ترکیبات میان دستی و پایین دستی صنایع می‌باشند که به علت تقاضای روزافزون مشتقات تولید شده از فنل، روز به روز به تولید آن در جهان افزوده می‌شود. این نوع ترکیبات به طور لایتناهی در طبیعت باقی مانده و خود به خود تجزیه شیمیایی نمی‌شوند [۱]. پساب‌های صنایع تولیدکننده حشره‌کش‌ها، علف‌کش‌ها، رنگ، داروسازی و همچنین آب‌های سطحی و آب رودخانه‌ها دارای مقادیر متنوعی از مشتقات فنلی هستند که مستلزم حذف می‌باشند [۲]. ۴-کلرو-۲-نیترو فنل از جمله ترکیبات فنلی مقاومی است که به صورت آزاد تا زمان نامعلوم در طبیعت باقی مانده و با روش‌های تخریب بیولوژیکی، حتی به مقادیر جزئی، قابل تجزیه نیست [۳]. به منظور کاهش و یا حذف کامل این ترکیب از محلول‌های آبی از روش‌های مختلفی مثل فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته [۴ و ۵] و جذب سطحی [۶-۸] استفاده شده است. استفاده از جاذب‌های طبیعی و ارزان قیمت نظیر بنتونیت از اهداف اصلی کاربرد فرآیند جذب سطحی در تصفیه آلاینده‌هاست. بنتونیت اصلاح شده به عنوان یک ماده با قابلیت بالا برای حذف آلاینده‌های آبریز از محلول‌های آبی ارائه شده است و بنابراین یک عامل بسیار امیدوارکننده در کنترل محیط‌زیست و کاهش علف‌کش‌ها (سموم دفع آفات) است [۹ و ۱۰]. نتایج بررسی جذب سطحی ترکیب ۴-تولوئن سولفونیک اسید بر روی بنتونیت عامل‌دار شده با سورفکتانت اکتا دسیل تری متیل آمونیوم برمی‌د نشان داد که حداکثر راندمان جذب سطحی در دمای ۴۵°C، سرعت همزدن ۱۷۰ دور در دقیقه، ۱/۵ g از جاذب و در غلظت اولیه ۵۰۰ mg/L اتفاق می‌افتد [۱۱]. در پژوهش دیگری جذب سطحی فنل بر روی بنتونیت عامل‌دار شده با سورفکتانت‌های هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برمی‌د و فنیل تری متیل آمونیوم برمی‌د مطالعه و مشخص شد که جذب سطحی

فل بر روی بنتونیت اصلاح شده به مراتب بهتر از بنتونیت خام است. همچنین معلوم شد که میزان جذب سطحی با افزایش دما افزایش می‌یابد که حاکی از گرماگیر بودن فرآیند بود. بررسی ایزوترم‌های جذب سطحی بر روی جاذب‌های عامل‌دار شده نیز نشان داد که از مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ تبعیت می‌کنند [۱۲]. در تحقیق حاضر ابتدا بنتونیت با دو نوع سورفکتانت (تترا بوتیل آمونیوم یدید و ستیل تری متیل آمونیوم برمید) عامل‌دار شد و سپس کارآئی جاذب‌ها در جذب سطحی ۴- کلرو-۲- نیترو فل مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، ایزوترم جذب سطحی نیز بررسی شد.

۲- فعالیت‌های تجربی

۴-کلرو-۲-نیتروفل (4C2NP) از شرکت فلوکا آلمان، بنتونیت (B) از شرکت شیمیایی دایجانگ کره جنوبی، تترا بوتیل آمونیوم یدید (TBAI) و ستیل تری متیل آمونیوم برمید (CTAB) از شرکت مرک آلمان خریداری شد. برای تهیه جاذب عامل‌دار، ۱۰ g بنتونیت داخل ارلن مایر ۲۵۰ mL ریخته شد و مقدار ۹۰ mL آب مقطر به آن اضافه شد. درحالی که محتویات ارلن بر روی همزن مغناطیسی همزده می‌شد، مقدار ۱ g سورفکتانت به آرامی به آن اضافه شد و به مدت ۳ ساعت در دمای آزمایشگاه همزده شد. محتویات ارلن از کاغذ صافی عبور داده شد و بعد از سه مرتبه شستشو با آب مقطر، به مدت ۳ ساعت در داخل آون با دمای ۱۰۵°C قرار داده شد تا پودر مورد نظر حاصل شود. جهت ارزیابی کیفیت پودرهای تهیه شده، طیف تبدیل فوریه زیر قرمز (FT-IR) بنتونیت و پودرهای عامل‌دار شده تهیه شد.

آزمایشات جذب سطحی ناپیوسته با استفاده از سه نوع جاذب (B، B-TBAI و B-CTAB) به منظور ارزیابی تأثیر متغیرهای عملیاتی انجام شد. در هر آزمایش، مقدار ۲۵۰ mL از محلول 4C2NP (با غلظت و pH معین) در ارلن مایر ریخته شد و بعد از اضافه نمودن جاذب، در دمای اتاق با همزن مغناطیسی همزده شد. در فواصل زمانی معین، نمونه برداری از ظرف انجام شد و پس از عبور از کاغذ صافی و به کمک دستگاه سانتیفریوژ نمونه‌ها صاف شدند. با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (HACH/DR 5000) و در طول موج جذب ماکزیمم 4C2NP ($\lambda_{max} = 220 \text{ nm}$)، مقدار غلظت محلول‌ها تعیین شد. برای تعیین راندمان جذب سطحی 4C2NP و نیز مقدار جذب شده آن بر روی سطح جاذب در لحظه تعادل به ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده شد:

$$Adsorption (\%) = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \times V \quad (2)$$

در این روابط C_0 ، C_t و C_e به ترتیب، غلظت اولیه، غلظت در لحظات مختلف و غلظت تعادلی محلول 4C2NP (بر حسب mg/L) می‌باشد. V حجم محلول (L) و m وزن جاذب (g) است.

از مدل‌های غیرخطی ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچو تمکین (به ترتیب معادلات ۳ الی ۵) برای ارزیابی برازش داده‌های تعادلی جذب سطحی استفاده شد.

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

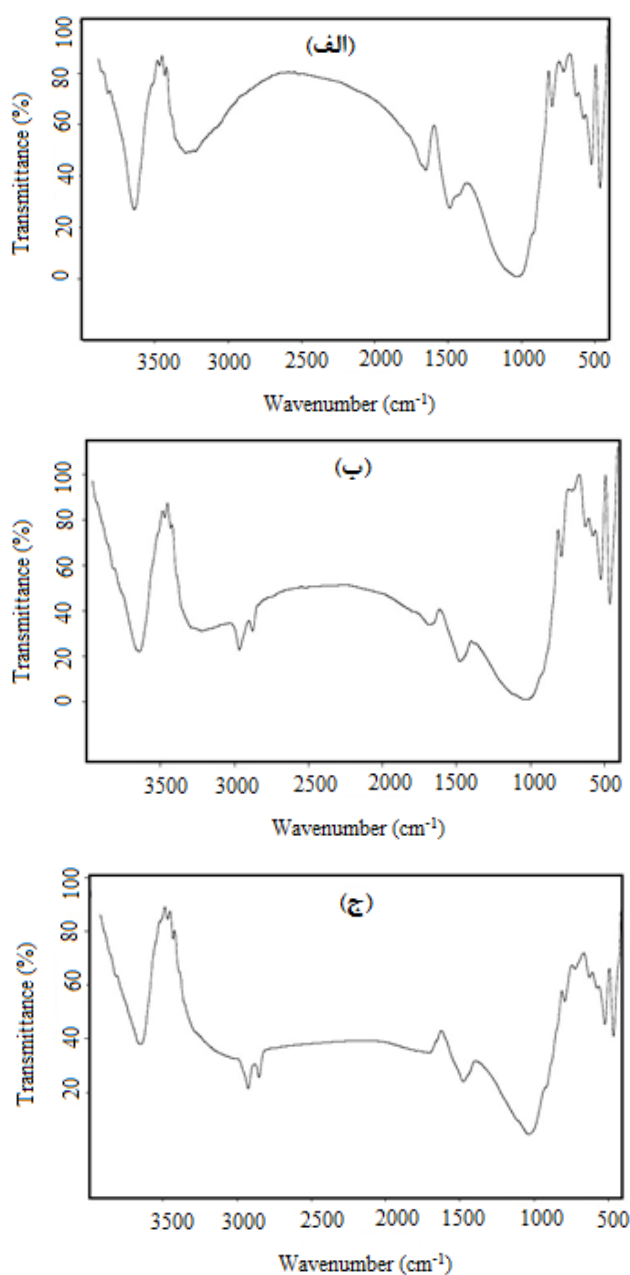
$$q_e = K_F C_e^n \quad (4)$$

$$q_e = B_1 \ln(K_T C_e) \quad (5)$$

در این روابط C_e و q_e به ترتیب غلظت و ظرفیت جذب تعادلی، q_m حداکثر ظرفیت جذب 4C2NP بر روی سطح جاذب و K_L ثابت تعادل جذب سطحی است. K_F و n ثابت‌های فروندلیچ هستند که K_F ظرفیت جذب سطحی و n تمایل به جذب سطحی را نشان می‌دهد. B_1 و K_T نیز ثابت‌های ایزوترم تمکین می‌باشند که به ترتیب در ارتباط با میزان گرمای جذب سطحی و ثابت پیوند تعادلی هستند [۱۳-۱۵].

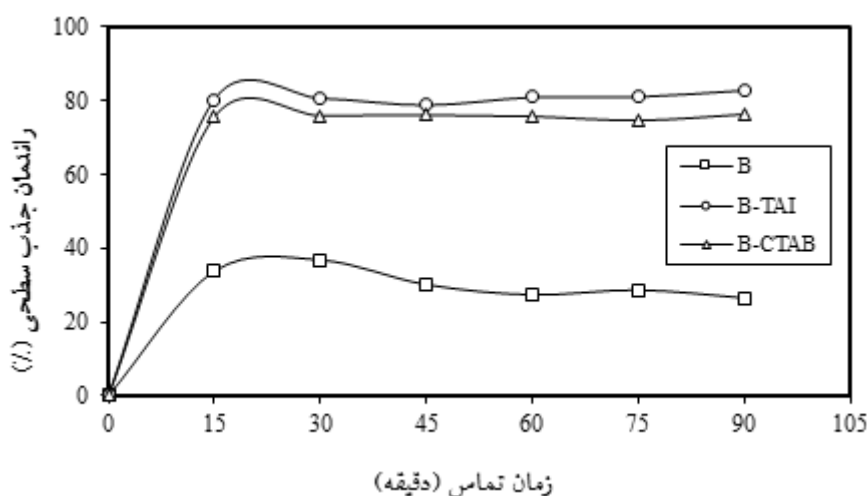
۳- نتایج و بحث

طیف FT-IR بنتونیت خام و بنتونیت عامل دار شده در شکل ۱ نشان داده شده است. مقایسه شکل ظاهری طیف‌ها نشان می‌دهد که عامل دار شدن بنتونیت خام با هر دو نوع سورفکتانت به خوبی صورت پذیرفته است. با توجه به شکل ۱-الف پیک‌های مشخصه بنتونیت خام که در محدوده $3640-3432 \text{ cm}^{-1}$ ظاهر شده‌اند به ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل اختصاص دارند [۱۶]. از طرف دیگر، پیک‌های مربوط به آلومینیوم، منیزیم و تعداد محدود مولکول‌های آب موجود در ساختار بنتونیت در ناحیه 1652 cm^{-1} ظاهر شده‌اند. پیک مربوط به ناحیه 1039 cm^{-1} نیز به ارتعاش کششی نامتقارن Si-O-Si بنتونیت اختصاص دارد. همچنین پیک‌هایی که از 713 الی 840 cm^{-1} کشیده شده‌اند از مشخصات کوارتز موجود در بنتونیت خام هستند و پیک‌های مربوط به نواحی $523-423 \text{ cm}^{-1}$ را می‌توان به ارتعاشات خمشی OSiO نسبت داد [۱۷]. پس از عامل دار شدن بنتونیت با TBAI و CTAB (شکل ۱-ب و ۱-ج) یک جفت پیک در نواحی 2850 و 2920 cm^{-1} ظاهر شده‌اند که مربوط به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن گروه‌های متیل و متیلن می‌باشند.



شکل ۱- طیف FT-IR (الف) B، (ب) B-TBAI و (ج) B-CTAB

با توجه به اینکه تعیین مدت زمان تماس یکی از عوامل مهم و تعیین کننده در فرآیند جذب سطحی می‌باشد لذا محلولی به غلظت 50 mg/L ($\text{pH} \approx 5/6$) خود محلول برابر $5/6$) تهیه شد و پس از افزودن 1 g از جاذب در دمای اتاق به مدت 90 دقیقه روی همزن مغناطیسی همزده شد و در فواصل زمانی 15 دقیقه نمونه برداری صورت گرفت. شکل ۲ نشان می‌دهد که سرعت جذب سطحی ترکیب $4\text{C}2\text{NP}$ توسط هر سه نوع جاذب در لحظات اولیه سریع بوده و پس از گذشت زمان اندکی لحظه تعادل فرا می‌رسد. در واقع در لحظات اولیه، تعداد جایگاه‌های در دسترس جاذبها بسیار زیاد بوده اما به تدریج، مکان‌های جذب سطحی اشباع شده و سرعت جذب توسط پدیده انتقال از جایگاه‌های بیرونی به درونی جاذبها کنترل می‌شود [۱۸]. نکته حائز اهمیت در شکل ۲، وجود تفاوت فاحش در میزان جذب سطحی توسط B (حدود 30%) با مقدار آن بر روی جاذب‌های عامل‌دار شده (بیش از 75%) است. در واقع پوشش سطح بنتونیت توسط سورفکتانت‌ها موجب افزایش برهمکنش‌های مولکولی بین مولکول‌های $4\text{C}2\text{NP}$ و سطوح جاذب‌های عامل‌دار می‌شود و لذا میزان جذب سطحی بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۱۲].



شکل ۲- اثر مدت زمان تماس در راندمان حذف $4\text{C}2\text{NP}$

برای مطالعه اثر مقدار جاذب، آزمایشات در پنج مقدار مختلف جاذب ($1, 2, 3, 4, 5 \text{ g}$) و یکسان بودن سایر عوامل (250 mL محلول $4\text{C}2\text{NP}$ با غلظت 50 mg/L و $\text{pH} \approx 5/6$ در دمای 25°C) در مدت زمان تعادلی 15 دقیقه دنبال شد. نتایج نشان داد که با افزایش جاذب، میزان جذب سطحی بر روی جاذبها افزایش می‌یابد. بدیهی است که با افزایش مقدار جاذب، تعداد جایگاه‌های فعال موجود بر روی آن افزایش یافته و در نتیجه، راندمان جذب سطحی بالا می‌رود. نتایج مشابهی در مطالعه جذب سطحی 4- تولوئن سولفونیک اسید بر روی بنتونیت عامل‌دار شده با سورفکتانت اکتا دسیل تری متیل آمونیوم برمید و نیز در بررسی حذف فنل توسط بنتونیت به روش جذب سطحی حاصل شد [۱۱ و ۱۹]. به منظور بررسی اثر pH محلول در میزان جذب سطحی، محلول‌هایی با pH برابر $3, 7, 9$ با هیدروکلریک اسید و سدیم هیدروکسید و به کمک دستگاه pH متر تهیه شد. در این مرحله، pH محلول به عنوان تنها متغیر آزمایش بوده و آزمایشات با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها (250 mL محلول $4\text{C}2\text{NP}$ با غلظت 50 mg/L ، 1 g جاذب و دمای 25°C) در مدت زمان تعادلی انجام شد. بر اساس نتایج حاصل مشخص شد که حداکثر راندمان جذب سطحی ترکیب $4\text{C}2\text{NP}$ بر روی جاذبها در pH های خنثی و اسیدی اتفاق می‌افتد. در محلول‌های آبی حاوی گونه‌های جذب شونده با قابلیت یونیزه شدن (مثل ترکیب $4\text{C}2\text{NP}$)، در pH هایی که جاذب و جذب شونده دارای بار الکتریکی ناهمنام هستند، به دلیل نیروهای جاذبه الکترواستاتیکی، جذب سطحی بیشترین مقدار ممکن را دارا است. نتایج بدست آمده از تعیین pH نقطه بار صفر (pH of zero point charge) بنتونیت خام و عامل‌دار شده با هر دو نوع سورفکتانت نشان داد که pH_{zpc} جاذبها حدود 6 است. با توجه به مقدار pK_a ترکیب $4\text{C}2\text{NP}$ ($\text{pK}_a = 6/46$)، این ترکیب در محلول‌های آبی و در $\text{pH} > 6/46$ یونیزه شده و آنیون 4- کلرو- 2- نیترو فئات را ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، در $\text{pH} < \text{pK}_a$ این ترکیب بصورت مولکولی ($\text{C}_6\text{H}_4\text{ClNO}_3$) و در $\text{pH} > \text{pK}_a$ عمدتاً بصورت آنیونی ($\text{C}_6\text{H}_3\text{ClNO}_3^-$) می‌باشد. از توضیحات اخیر می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر راندمان حذف ترکیب $4\text{C}2\text{NP}$ بر روی جاذبها در $\text{pH} < 6/46$ اتفاق می‌افتد. در واقع در $\text{pH} > 6/46$ و با تشکیل آنیون 4- کلرو- 2- نیترو فئات،

در اثر ایجاد نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین آنیون‌های ۴-کلرو-۲-نیترو فئات و سطح منفی جاذب‌ها میزان جذب سطحی کاهش می‌یابد. برای بررسی اثر غلظت اولیه محلول 4C2NP در میزان جذب سطحی، محلول‌هایی با غلظت ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ mg/L تهیه شد و بعد از اضافه نمودن جاذب، آزمایشات دنبال شد. در این آزمایش‌ها تنها متغیر، غلظت اولیه محلول بوده و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شد و آزمایشات در مدت زمان تعادلی دنبال شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه ترکیب 4C2NP میزان جذب سطحی آن بر روی جاذب‌ها کاهش می‌یابد. مطالعات ایزوترمی در غلظت‌های مختلفی از محلول 4C2NP (۱۰-۵۰ mg/L) با ۱ g از جاذب، در دمای ۲۵°C، pH خود محلول (۵/۶ ≈ pH) و مدت زمان تعادلی ۱۵ دقیقه انجام شد. تخمین ثابت‌های ایزوترمی با استفاده از نرم‌افزار پلی‌مت (نسخه ۶/۱۰) انجام شد که ثابت‌های ایزوترمی به همراه مقادیر ضریب همبستگی (R^2) در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱- داده‌های ایزوترم‌های جذب سطحی 4C2NP بر روی بنتونیت ساده و عامل‌دار

B-CTAB	B-TBAI	B	پارامترها	مدل ایزوترم
۱۶/۲۶	۱۱/۸۲	۵/۵۵	q_m (mg/g)	
۰/۱۰	۰/۲۹	۰/۰۷	K_L (L/mg)	لانگمویر
۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۸۷	R^2	
۱/۶۵	۲/۷۰	۰/۶۴	$K_F[(\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}]$	
۱/۴۰	۱/۷۵	۱/۸۵	n	فروندلیچ
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	R^2	
۳/۴۳	۲/۹۴	۱/۳۴	B_1	
۱/۱۰	۲/۳۷	۰/۵۹	$K_T(\text{L/g})$	تمکین
۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۹۲	R^2	

از مقایسه مقادیر مندرج در جدول ۱ ملاحظه می‌شود که برای هر سه نوع جاذب، مدل فروندلیچ با R^2 بالاتر تطابق بهتری را با داده‌های تعادلی جذب سطحی دارد. در این مدل، هرگاه مقدار n کمتر از یک باشد جذب سطحی، فیزیکی و در غیر اینصورت شیمیایی است [۲۰]. در مطالعه حاضر، مقدار n بزرگ‌تر از یک برای هر سه نوع جاذب بیانگر جذب سطحی شیمیایی 4C2NP بر روی بنتونیت و گونه‌های عامل‌دار آن می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق حاکی از آن است که فرآیند جذب بر روی سطح جاذب‌ها بعد از ۱۵ دقیقه به تعادل می‌رسد. ارزیابی اثر مقدار جاذب نشان داد که با افزایش مقدار جاذب راندمان جذب سطحی افزایش می‌یابد. بررسی اثر غلظت اولیه ترکیب 4C2NP نشان داد که با افزایش غلظت، مکان‌های فعال جاذب سریع‌تر اشغال شده و دیگر جاذب قادر به جذب سطحی بیشتری از ترکیب آلی نمی‌باشد. در واقع اشباع شدن جاذب، مانع از جذب بیشتر می‌گردد. مطالعه اثر pH نشان داد که حداکثر راندمان جذب سطحی 4C2NP بر روی جاذب‌ها در محیط‌های خنثی و اسیدی اتفاق می‌افتد. از بررسی ایزوترم‌های جذب سطحی نیز مشخص شد که جذب 4C2NP بر روی هر سه نوع جاذب از مدل فروندلیچ پیروی می‌نماید.

- [1] Fang HH, Chen O. Toxicity of phenols toward aerobic biogranules. *Water Research* 1997; 31(9):2229–2242.
- [2] ZareenK, Anjaneyulu Y. Influence of soil components on adsorption–desorption of hazardous organics-development of low cost technology for reclamation of hazardous waste dumpsites. *Journal of Hazardous Materials*, B2005; 118(1-3):161–169.
- [3] Legrini O, Oliveros E, Braun AM. Photochemical processes for water treatment. *Chemical Reviews* 1993; 93(2):671–698.
- [4] Saritha P, Aparana C, Himabindu V, Anjaneyulu Y. Advanced oxidation of 4-chloro-2-nitrophenol (4C-2-NP)- A comparative study. *Journal of Hazardous Materials* 2007; 149(3):609-614.
- [5] Gharbani P, Khosravi M, Tabatabaie SM, Zare K, Dastmalchi S, Mehrizad A. Degradation of trace aqueous 4-chloro-2-nitrophenol occurring in pharmaceutical industrial wastewater by ozone. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2010; 7(2):377-384.
- [6] Adami S, Fakhri A. Adsorption of 4-chloro-2-nitrophenol by zero valent iron nanoparticles and Pd-doped zero valent iron nanoparticles surfaces: isotherm, kinetic and mechanism modeling. *Journal of Physical Chemistry and Biophysics* 2013; 3(2):1-5.
- [7] Mehrizad A, Aghaie M, Gharbani P, Dastmalchi S, Monajjemi M, Zare K. Comparison of 4-chloro-2-nitrophenol adsorption on single-walled and multi-walled carbon nanotubes. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering* 2012; 9(5):1-6.
- [8] Mehrizad A, Zare K, Aghaie H, Dastmalchi S. Removal of 4-chloro-2-nitrophenol occurring in drug and pesticide waste by adsorption onto nano-titanium dioxide. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2012; 9(2): 355-360.
- [9] LeBaron PC, Wang Z, Pinnavaia TJ. Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Applied Clay Science* 1999; 15(1-2):11-29.
- [10] Carter MR, Stewart BA. *Structure and Organic matter Storage in Agricultural soils*. CRC Press, Boca Raton, FL; 1995.
- [11] Yildiz N, Kapucu H, Alimli C. Adsorption of 4-toluene sulfonic acid on modified bentonite: Optimization by Response Surface Methodology. *Turkish Journal of Engineering Environmental Science* 2003; 27:397-407.
- [12] Alkaram UF, Mukhlis AA, Al-Dujaili AH. The removal of phenol from aqueous solutions by adsorption using surfactant-modified bentonite and kaolinite. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 169(1-3):324-332.
- [13] Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *Journal of American Chemical Society* 1916; 38(11):2221–2295.
- [14] Freundlich HMF. Über die adsorption in losungen. *Zeitschrift für physikalische Chemie* 1906; 57(A):385-470.
- [15] Temkin M, Pyzhev V. Kinetics of the synthesis of ammonia on promoted iron catalysts. *Journal of Physical Chemistry* 1939; 13:851-867.
- [16] Wilson MJ. *Clay Mineralogy Spectroscopic and Determinative Methods*. UK. Chapman and Hall; 1994.
- [17] Farmer CV. *The Infrared Spectra of Minerals*, Mineralogical Society. London; 1974.
- [18] Anbia M, Ghaffari A. Adsorption of phenolic compounds from aqueous solutions using carbon nanoporous adsorbent coated with polymer. *Applied Surface Science* 2009; 255(23):9487–9492.
- [19] Ehssan N, Yehia E. Adsorption of phenol from aqueous solutions by local Egyptian bentonite. *Journal of American Science* 2012; 8(8):581-589.
- [20] Behnajady MA, Bimeghdar S. Synthesis of mesoporous NiO nanoparticles and their application in the adsorption of Cr (VI). *Chemical Engineering Journal* 2014; 239(1):105-113.

روش‌های اندازه‌گیری کشش سطحی مایعات

مجید شاکر*، مازیار صهبایغمایی، بابک رئیسی، رضا ریاحی فر

پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک



مهندس مجید شاکر، نویسنده
اول مقاله، از پژوهشگاه مواد و
انرژی

majidshaker@gmail.com

چکیده: مایعات در رشته‌ها و زمینه‌های مختلف مهندسی از جمله پوشش دادن، رنگ‌رزی، نساجی، ساخت محلول‌ها و امولسیون‌ها، میکرو امولسیون‌ها و داروها، الکترونیک، اسپری کردن، بازیافت روغن‌ها و خصوصاً فرایندهای سرامیکی کاربردهای متنوعی دارند. به همین سبب، مطالعه ویژگی‌های فیزیکی مایعات حائز اهمیت است. یکی از این ویژگی‌های فیزیکی مهم مایعات کشش سطحی آن‌ها می‌باشد و آنچه بر همیت کشش سطحی می‌افزاید ارتباط آن با نقطه جوش و قدرت پیوندهای بین مولکول‌های تشکیل دهنده مایع و بدان جهت، ارتباط آن با کیفیت پوشش و لایه‌های نشانده شده است. برای اندازه‌گیری کشش سطحی در طول ۲۰۰ سال اخیر، روش‌های متعددی ابداع شده است. بدلیل تنوع، هر کدام از این روش‌ها با روش‌های دیگر تفاوت‌های چشم‌گیری از لحاظ دقت و محدوده اندازه‌گیری و هزینه دارد. خطاهای روش‌های اندازه‌گیری کشش سطحی نیز توسط محققان پس از ابداع، مورد بررسی قرار گرفته و شیوه اولیه اندازه‌گیری کشش سطحی با توجه به این اطلاعات اصلاح شده و تا اکنون دقت غالب روش‌ها بالا رفته است. این مقاله، به معرفی و مقایسه روش‌های اندازه‌گیری کشش سطحی مایعات می‌پردازد.

کلمات کلیدی: کشش سطحی، انرژی سطحی، روش‌های اندازه‌گیری، مهندسی سطح

۱- مقدمه

هر ماده‌ای جامد یا مایع از لحاظ هندسی از سطح و بخش حجمی یا درونی تشکیل شده است که هر کدام ویژگی‌های منحصر به فرد خود را دارد. سطح مواد مختلف از نظر تمایل به چسبندگی و برهم‌کنش با مواد دیگر، در مقایسه با بخش درونی خود بسیار متفاوت اند. یکی از عوامل تعیین کننده برهم‌کنش بین مایع و جامد، کشش سطحی آن مایع در تماس با بخار است که به γ_{LV} معروف است و به مختصر، کشش سطحی نامیده می‌شود. این ویژگی بدین صورت است که هر چه کشش سطحی مایع بیشتر باشد، قطرات مایع، تمایل بیشتری به داشتن شکل کروی روی سطح جامد و خود مایع تمایل به کم‌تر شدن برهم‌کنش بین آن مایع و جامد و البته نقطه جوش بالاتری هم دارد. یکی از پدیده‌های مهم دیگری که کشش سطحی بر آن اثر گذار است، ترشوندگی است. به عبارتی هر چه کشش سطحی مایع بیشتر باشد، مایع، سطح زیرلایه را کم‌تر خیس می‌کند و زاویه تماس بیش‌تری دارد.

پدیده‌های ناشی از کشش سطحی ابتدا توسط داوینچی (۱۵۱۹-۱۴۵۲ میلادی) در قالب پدیده موینگی کشف شد [۱، ۲]. اثر موینگی در لوله‌ها و ظروف شیشه‌ای در قرن ۱۸ میلادی توسط هاوکسبی^۱ کشف شد و کمی بعد جورین^۲ نشان داد که ارتفاع بالا آمدن مایع درون لوله فقط به اندازه آن لوله در محل تشکیل هلال بستگی دارد. اسحاق نیوتن^۳ در آخرین ویرایش کتاب اپتیکی که بعد از مرگش چاپ شد در مورد نیروهای همبستگی مایعات و چسبندگی مایعات به جامدات بحث کرد. توماس یانگ^۴ در مقاله‌اش (۱۸۰۴ میلادی) راجع به انسجام سیالات، به طور دقیق و بدون محاسبات ریاضی راجع به اثرات کشش سطحی و ترشوندگی بحث کرد که بعداً به زبان ریاضی توسط لاپلاس^۵ بیان شد (۱۸۰۶ میلادی)، که منجر به درک کنونی ما از فیزیک و شیمی سطح گردید.

¹ Francis Hawksbee

² James Jurin

³ Isaac Newton

⁴ Thomas Young

⁵ Pierre-Simon Laplace

بدون وجود کشش سطحی، آب درون آوندهای درختان و گیاهان بالا نمی‌رفت و گیاهان و درختان رشد نمی‌کردند و خون در بدن به خوبی حرکت نمی‌کرد و کوچکترین ذرات گرد و غبار نیز به درون آب دریاها نفوذ می‌کردند و روی صخره‌های مرجانی و گیاهان درون دریاها می‌نشستند و سبب نابودی اکوسیستم‌ها می‌شدند و غشای سلول‌ها نابود می‌شد که منجر به نابودی کل سلول می‌شود. حتی عبارت فوت کوزه‌گری در بین سرامیک سازان تداعی‌گر شناخت اثرات این پدیده از دیرباز است.

در دهه‌های اخیر مطالعه کشش سطحی، نیروهای بین مولکول‌ها در فصل مشترک سطح تماس فازها و جذب سطحی عوامل فعال سطحی را در سطح مایعات روشن کرده است. موادی مثل تخم مرغ، کره، شیر، جوهر، سفال و رنگ که از دیرباز بشر با آن‌ها سر و کار داشته، امروزه با مطالعه کشش سطحی بهتر درک می‌شوند و قابلیت بهبود دارند. تکنیک‌های نوین مانند پلیمریزاسیون امولسیون، فرمولاسیون داروسازی، میکرو امولسیون‌ها، کاتالیزورهای میسلار^۱، شیوه‌های نوین لعابزنی و فرایندهای سرامیکی، فیلم‌های عکاسی و سنتز کریستال‌های مایع جدید برای کاربرد میکروالکترونیک همگی به طور مستقیم از مطالعه کشش سطحی برخاسته‌اند. مشکلاتی نظیر بازیافت روغن، نشت آن، تمیز کردن منابع آب و کاهش آلودگی محیط به کمک مطالعه کشش سطحی مایعات حل می‌شوند [۳].

۲- انرژی سطح

اجزای سازنده یک ماده از لحاظ انرژی در بخش درونی و سطح و نزدیک به سطح تفاوت خواهند داشت. به عبارتی هر جز در بخش درونی، تحت تاثیر برآیند نیروهای یکنواخت است. [۴]. وقتی سطحی ایجاد می‌شود، انرژی کل سیستم مقدار ثابت جدیدی بیش از پیش دارد. این انرژی اضافی، انرژی آزاد سطح یا به طور دقیق‌تر، انرژی آزاد اضافی سطح است که با γ نشان داده می‌شود. وقتی عبارت انرژی آزاد اضافی ویژه سطح به کار برده می‌شود، نشان‌دهنده انرژی بر واحد سطح است که معمولاً بر حسب mJ.m^{-2} است جهت این نیرو را نیز می‌توان به سادگی تشخیص داد.

۳- کشش سطحی

مولکول‌های یک مایع توسط نیروی جاذبه بین مولکولی به یکدیگر متصل‌اند. میانگین همه نیروهای وارد بر یک مولکول در بخش درونی مایع برابر صفر است، اما در سطح مایع چنین نیست. بلکه نیرویی در جهت بخش درونی وجود دارد که همان نیرویی است که برای افزایش سطح باید با آن مقابله کرد. انرژی مصرف شده طی این فرایند انرژی آزاد سطح نامیده می‌شود. نیروی ناشی از کشش سطحی در فصل مشترک سبب می‌شود که قطره مایع روی سطح جامد به داشتن کوچک‌ترین سطح تمایل پیدا کند. کشش سطحی علت پدیده‌هایی نظیر مویینگی نیز هست. کشش سطحی و انرژی آزاد اضافی ویژه سطحی یک مایع با هم برابرند. ولی برای جامدات چنین نیست [۵].

کشش سطحی مقدار کار یا انرژی بر واحد سطح است که برای افزایش مساحت سطح یک مایع باید مصرف شود تا بر نیروهای بین مولکولی غلبه کرد. البته برخی کشش سطحی را نیرو بر واحد طول نیز تعریف می‌کنند. کشش سطحی را معمولاً با γ نشان می‌دهند و واحدش در مراجع $[\text{mN/m}]$ ، $[\text{dyn/cm}]$ یا $[\text{J/m}^2]$ است.

۴- روش‌های اندازه‌گیری کشش سطحی مایعات

اهمیت کشش سطحی ایجاب می‌کند تا اطلاعات دقیقی از مقدار آن برای مایعات داشته باشیم. به طور کلی می‌توان روش‌های اندازه‌گیری کشش سطحی را به دو دسته استاتیک و دینامیک تقسیم‌بندی کرد. روش‌های استاتیک نظیر حلقه و صفحه هستند که می‌توانند کشش سطحی را برای یک مایع در حالی که کشش سطحی ثابت است و تغییر نمی‌کند اندازه بگیرند، ولی روش‌های دینامیک علاوه بر اندازه‌گیری کشش سطحی استاتیک، کشش سطحی دینامیک را که کشش سطحی متغیر با زمان (مثلاً با افزودن سورفاکتانت یا تغییر دما) است، اندازه‌گیری می‌کنند. در ادامه مکانیزم، دقت، مزایا و معایب روش‌های اندازه‌گیری کشش سطحی بررسی خواهد شد.

¹ micellar

۴-۱- بالا آمدن مایع در لوله موئین^۱

این روش که قدیمی‌ترین روش تعیین کشش سطحی مایعات است، از یک لوله موئین که به صورت عمودی وارد مایعات می‌شود بهره می‌برد. هنگامی که مایعی درون لوله موئین وارد می‌شود و در جایی ثابت می‌ماند، دو نیرو در تعادل هستند؛ یکی نیروی وزن مایع و دیگری نیروی ناشی از کشش سطحی، به طوری که مولفه عمودی نیروی کشش سطحی با نیروی وزن برابری می‌کند [۶]. پس از ساده سازی معادله اولیه، معادله (۱) حاصل می‌شود که در آن شعاع لوله موئین بر حسب $[m]$ ، γ کشش سطحی مایع بر حسب $[J/m^2]$ ، زاویه ترشوندگی و ρ چگالی مایع بر حسب $[kg/m^3]$ است.

$$\gamma = \frac{rh\rho g}{2\cos\theta} \quad (1)$$

اگر مایع دیواره لوله موئین را کاملاً خیس کند زاویه تماس صفر است، ولی اگر تر نکند زاویه تماس 180° و در غیر این صورت زاویه تماس باید اندازه‌گیری شود و سپس در معادله (۱) وارد شود. برای اندازه‌گیری با دقت بالا با این روش، باید تجهیزات دقیق بررسی شکل هلال و زاویه تماس مایع-شیشه داشت تا در معادله (۱) قرار داد و مقدار دقیق کشش سطحی را به دست آورد. اما این روش معمولاً به خاطر سادگی و ارزان بودنش مورد استفاده قرار می‌گیرد و به همین خاطر غالباً از هیچ گونه تجهیزاتی برای تعیین دقیق زاویه تماس مایع-شیشه استفاده نمی‌شود و فرض می‌شود که مایع، لوله موئین را کاملاً تر می‌کند ($\theta=0^\circ$) یا به هیچ وجه تر نمی‌کند ($\theta=180^\circ$) که همین امر کاربرد این روش را بسیار محدود می‌کند و دقت این روش را به شدت کاهش می‌دهد. این روش معمولاً به سادگی در هر آزمایشگاهی قابل استفاده است و در بازار دستگاهی برای بررسی کشش سطحی به روش بالا آمدن مایع در لوله موئین به فروش نمی‌رسد، چون تنها با استفاده از یک لوله موئین و خط‌کش می‌توان مقدار کشش سطحی را البته با دقت کم تعیین کرد.

۴-۲- وزن یا حجم قطره (قطره سنج)^۲

روش قطره سنجی یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تعیین مقدار کشش سطحی است. در این روش، قطرات در نوک یک لوله موئین که مایع پشت آن مطابق شکل ۱-الف جمع شده است، به آرامی مانند شکل ۱-ب تشکیل می‌شوند. هنگامی که قطره در نوک لوله موئین به صورت عمودی تشکیل می‌شود، پس از مدتی از نوک لوله موئین جدا می‌شود که این جدایش به سبب بیش‌تر شدن نیروی وزن قطره از نیروی کشش سطحی است. این روش برای اولین بار توسط تیت^۳ در سال ۱۸۶۴ میلادی ابداع شد که منجر به کشف یک معادله برای این پدیده شد که امروزه به معادله تیت (معادله (۲)) معروف است. این فرمول از آن جا می‌آید که در لحظه‌ای که قطره شروع به افتادن می‌کند، نیروی وزن آن قطره و نیروی ناشی از کشش سطحی که برابر حاصل ضرب $2\pi r\gamma$ ، محیط حلقه در γ ، کشش سطحی است، با هم برابر می‌شوند.

$$W = 2\pi r\gamma \quad (2)$$

که در آن W وزن قطره، r شعاع لوله موئین و γ کشش سطحی مایع است. نکته مهمی که برای استفاده از معادله (۲) باید مد نظر قرار داد این است که وزن قطره‌ای که می‌افتد 60% وزن قطره‌ای است که در نوک لوله موئین تشکیل می‌شود و با w' نمایش داده می‌شود. به همین سبب، یک ضریب تصحیح f برای معادله (۲) در نظر گرفته شد که بیان‌گر نسبت وزن قطره جدا شده به وزن قطره تشکیل شده (w/w') در نوک لوله موئین است و معادله تیت را به شکل زیر اصلاح می‌کند.

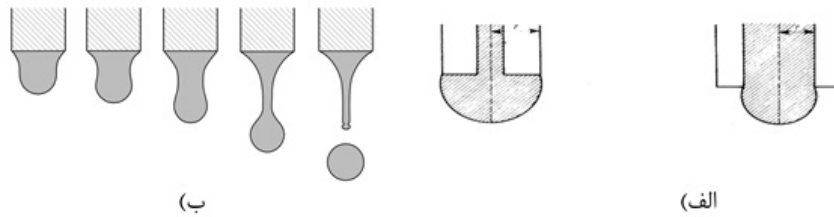
$$w' = 2\pi r\gamma f \quad (3)$$

¹ capillary rise

² drop weight/volume (Stalagmometric method)

³ Tate

اطلاعات ضریب تصحیح از نشریات [۷] گرفته شده است که توسط هارکینز^۱ و برون^۲ ارائه شده است [۸]. هارکینز و برون متوجه شدند که ضریب f تابعی از شعاع لوله موئین، v حجم قطره، و ثابت a که یک ویژگی قطره سنج است، می‌باشد.



شکل ۱- الف) در تصویر سمت راست، مایع نوک لوله موئین را تر نمی‌کند، ولی در تصویر سمت چپ مایع نوک لوله موئین را تر می‌کند. ب) مراحل تشکیل و جدایش قطره در نوک لوله موئین

در عمل، پس از افتادن چند قطره و محاسبه وزن میانگین آن‌ها، می‌توان حجم قطره را در صورتی که چگالی مایع مشخص باشد، محاسبه کرد و در نهایت کشش سطحی به کمک معادله (۴) محاسبه می‌شود.

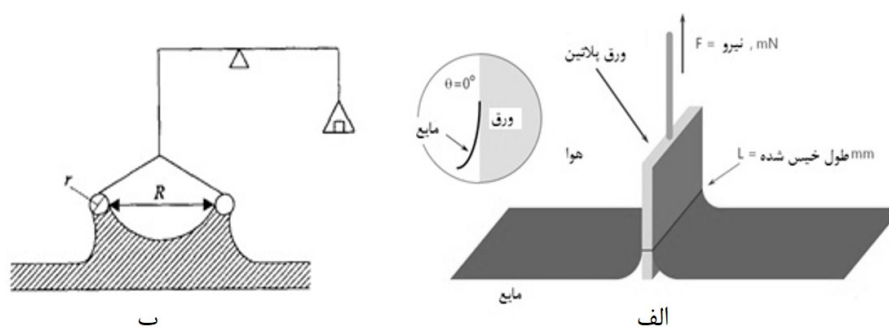
$$\gamma = \frac{mg}{2\pi r f} \quad (4)$$

در صورت داشتن حجم قطره می‌توان کشش سطحی را بر حسب حجم نیز محاسبه کرد. به همین دلیل است که نام دیگر این روش اندازه‌گیری، روش حجم قطره است.

برخی از سازندگان معتبر این دستگاه‌ها، شرکت کروس^۳ (مدل DVT 50) و شرکت لائودا^۴ (مدل TVT2/M) هستند. این دستگاه‌ها از قابلیت اندازه‌گیری کشش سطحی دینامیک برخوردار نیستند. اگر چه این نوع دستگاه‌ها دقت مناسبی در حد هزارم mN/m و رنج اندازه‌گیری قابل قبولی دارند، قیمت انواع تجاری این نوع دستگاه نسبت به کاربردش گران است.

۳-۴- ورق ویلهلمی^۵

یکی دیگر از روش‌هایی که برای اندازه‌گیری مقدار کشش سطحی به کار برده می‌شود، روش ورق ویلهلمی است. در این روش به منظور اندازه‌گیری کشش سطحی یک ورق تمیز پلاتین، شیشه یا کاغذ صافی به طور عمودی تا نصف ارتفاع آن ورق وارد مایع می‌شود. وقتی که مایع سطح ورق را کاملاً خیس کند، در نزدیکی ناحیه سه فاز، نیروی کشش سطحی به صورت عمودی به ورق وارد می‌شود (شکل ۲-الف). در صورت تر نشدن کامل، کسینوس زاویه تماس (θ) در نیروی ناشی از کشش سطحی ضرب می‌شود. برای تعیین مقدار کشش سطحی از معادله ویلهلمی (معادله (۵)) استفاده می‌شود و این روش به افتخار او و به پاس زحماتش در بررسی نیروی وارد بر ورق به نام او نام‌گذاری شد [۹].



شکل ۲- الف) شماتیکی از روش ویلهلمی^۵ ب) شماتیک روش حلقه

¹ Harkins

² Brown

³ Kruss

⁴ Lauda

⁵ Wilhelmy plate

⁶ <http://www.kruss.de>, برگرفته از وبسایت شرکت کروس

اگر ورقی به عرض l و وزن W_{plate} موجود باشد، نیروی لازم برای جدا کردن ورق از سطح مایع با توجه به معادله ویلهلمی به صورت زیر است.

$$F = W_{total} = W_{plate} + 2l\gamma \cos \theta \quad (5)$$

عدد دو در فرمول به سبب تماس هر دو وجه ورق با مایع مشاهده می‌شود و از ضخامت ورق صرف نظر می‌شود. در صورت تر شونده‌گی کامل ورق ($\theta=0^\circ$)، معادله ویلهلمی به شکل زیر ساده می‌شود.

$$\gamma = \frac{W_{total} - W_{plate}}{2l} \quad (6)$$

نیروی وارد شده بر ورق با توجه به میزان ترشونده‌گی ورق، به وسیله یک کشش سنج^۱ یا میکرو بالانس^۲ اندازه‌گیری می‌شود. در این روش ورق باید کاملاً تمیز باشد، زیرا هر گونه آلودگی و ناهمواری روی ورق نتایج را از مقدار واقعی منحرف می‌سازد. شرکت کیبرون^۳ دستگاه‌های AquaPi و EZ-Pi Plus و شرکت کروس دستگاه‌های K 11، K 20 و K 100 را می‌سازند که با هر دو روش ویلهلمی و حلقه کار می‌کنند و رنج اندازه‌گیری دستگاه‌های ساخت شرکت کروس تا 2000 mN/m نیز می‌رسد که رنج چشم‌گیری است. دقت این دستگاه‌ها به طور عادی 0.1 mN/m و برای دستگاه K 100 شرکت کروس 0.01 mN/m است. از لحاظ قیمت این دستگاه‌ها با توجه به دقت و رنج اندازه‌گیری که دارند قیمت گذاری می‌شوند و برای مدل‌های اتوماتیک قیمت بالایی دارند.

۴-۴-۴ حلقه^۴

این روش نیز که مانند روش ورق ویلهلمی بر اساس اندازه‌گیری نیرو است، توسط دو نوی^۵ فرانسوی در سال ۱۹۱۹ میلادی ابداع شد [۱۰]. تفاوت این روش با روش ورق ویلهلمی در این است که به جای ورق، از حلقه استفاده می‌شود. در این روش، یک حلقه از جنس پلاتین وارد مایع می‌شود و نیرویی که برای جدا کردن حلقه از سطح مایع لازم است به دقت اندازه گرفته می‌شود که با کشش سطحی ارتباط دارد (شکل ۲-ب). حلقه باید عاری از هر گونه لکه و خش باشد. چون نتایج به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

نیروی نهایی مورد نیاز برای جدا کردن حلقه (W_t) طبق معادله (۷)، برابر مجموع وزن حلقه و نیروی ناشی از کشش سطحی ضرب در ۲ است، چون کشش سطحی بر هر دو محیط داخلی و خارجی حلقه نیرو وارد می‌کند.

$$W_t = W_r + 4\pi R\gamma = W_r + 2l\gamma \quad (7)$$

در این معادله R شعاع حلقه است که به دلیل بسیار باریک بودن سیمی که حلقه از آن ساخته شده است، فرض می‌شود که شعاع داخلی و خارجی حلقه برابر است. مقدار کشش سطحی که از معادله (۷) به دست می‌آید، تا ۲۵٪ خطا دارد. به همین سبب، هارکینز و جردن^۶ معادله (۷) را به صورت تجربی اصلاح کردند [۱۱]. این مقدار اصلاحیه تابعی از R شعاع حلقه، r شعاع سیم حلقه، V حجم مایعی که به هنگام بالا بردن حلقه تا زمان جدا شدن حلقه بالا می‌آید و ارتفاع حلقه بالاتر از سطح مایع است. این اصلاح، امکان تعیین دقیق کشش سطحی و کشش فصل مشترک مایع-مایع را فراهم می‌آورد.

دستگاه‌های AquaPi و EZ-Pi Plus ساخت شرکت کیبرون و دستگاه‌های K 11، K 20 و K 100 ساخت شرکت کروس، مقدار کشش سطحی را با استفاده از هر دو روش ویلهلمی و حلقه، مطابق آن چه در مورد ورق ویلهلمی بیان شد، تعیین می‌کنند. کلیه دستگاه‌هایی که به این روش کار می‌کنند، مانند روش ورق ویلهلمی، امکان بررسی کشش سطحی دینامیک را ندارند و فقط قادر

¹ tensiometer

² microbalance

³ Kibron

⁴ Du Nouy ring method

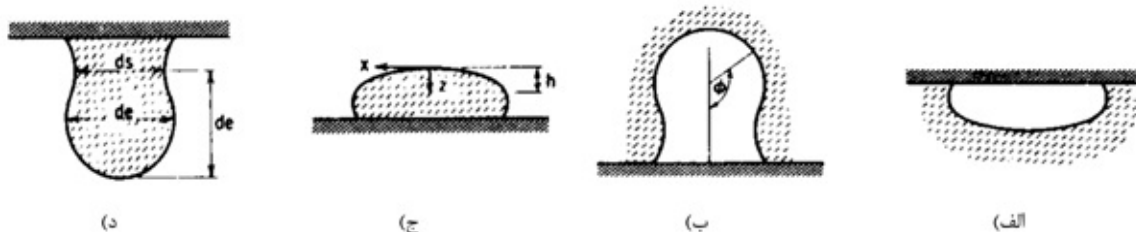
⁵ Du Nouy

⁶ Jordan

به اندازه‌گیری کشش سطحی استاتیک هستند.

۴-۵- بررسی اپتیکی کشش سطحی^۱

وقتی قطره یا حبابی تشکیل می‌شود، اگر اندازه اش از یک مقدار بحرانی بزرگ‌تر باشد، آن گاه نیروی جاذبه بر شکل آن قطره یا حباب تاثیر می‌گذارد و آن را دچار تغییر شکل می‌کند. در چنین شرایطی که نیروهای سطحی و جاذبه با یکدیگر قابل مقایسه هستند، می‌توان مقدار کشش سطحی مایع یا کشش بین سطحی مایع-مایع را تعیین کرد. مطابق شکل ۳ از چهار روش اپتیکی که در این شکل نام برده شده، می‌توان کشش سطحی را با بررسی شکل یا زاویه تماس محاسبه کرد.



شکل ۳- (الف) حباب گیر کرده (ب) حباب چسبیده (پ) قطره چسبیده (ت) قطره آویزان

به عنوان مثال، برای حالتی که قطره آویزان مورد بررسی است، مقدار S ، مطابق معادله (۸) باید تعیین شود [۱۲].

$$S = \frac{d_s}{d_e} \quad (۸)$$

که در آن قطر قطره یا حباب آویزان در بیشینه پهنای آن است و d_e عرض قطره یا حباب در فاصله h_e از پایین‌ترین نقطه آن است. در نهایت، کشش سطحی با استفاده از این روش از معادله (۹) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$\gamma = \frac{\Delta d g d_e^2}{H} \quad (۹)$$

که در آن H تابعی از S است و مقادیر $1/H$ در جداولی در نشریات آورده شده است [۱۳، ۱۴]. این روش نیز مانند سایر روش‌ها نیاز به اصلاح دارد که محققان در تلاش هستند تا قابلیت کاربرد این روش را برای شرایط مختلف فراهم کنند و با رفع نواقص و خطاها قابلیت دستگاه‌هایی که به این روش کار می‌کنند را افزایش دهند [۱۲، ۱۵-۲۰]. شرکت بیولین ساینترفیک^۲ یکی از تولیدکنندگان دستگاه‌های اندازه‌گیری کشش سطحی است که به روش اپتیکی کار می‌کنند. از محصولات این شرکت می‌توان دستگاه‌های Theta و Theta Lite را نام برد. این دستگاه‌ها مزایایی همچون بازه اندازه‌گیری وسیع از صفر تا 1000 mN/m و دقت خوبی در حد صدم mN/m دارند. از معیاب این دستگاه‌ها گران‌تر بودن از سایر دستگاه‌های اندازه‌گیری که به روش‌های دیگر کار می‌کنند و نیاز داشتن به یک برنامه برای تحلیل شکل قطره یا حباب و عدم توانایی اندازه‌گیری کشش سطحی دینامیک را می‌توان نام برد.

۴-۶-۶- قطره چرخان^۳

روش قطره چرخان، یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری کشش سطحی است که معمولاً برای اندازه‌گیری کشش سطحی مایع-گاز و مایع-مایع با مقدار کشش سطحی کم ($\gamma < 10 \text{ mN/m}$) استفاده می‌شود. این روش به این صورت کار می‌کند که دو فاز مایع با چگالی‌های متفاوت، درون یک محفظه لوله‌ای بسته قرار می‌گیرند که حول یک محور افقی، با سرعت معین می‌چرخد. تحت تاثیر نیروی ناشی از چرخش (گریز از مرکز) و کشش سطحی، فاز سبک‌تر که مقدار کم‌تری دارد، به شکل تعادلی یک قطره کش آمده حول محور چرخش در می‌آید (شکل ۴). پس از شروع چرخش، شکل حباب یا قطره در اثر نیروی گریز از مرکز تغییر می‌کند

¹ optical tensiometry

² Biolin Scientific

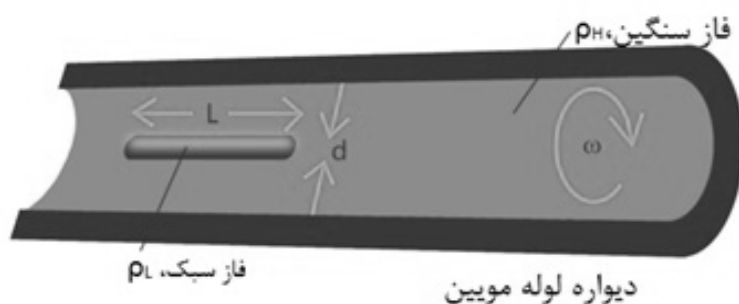
³ spinning drop

تا زمانی که در اثر تعادل نیروی گریز از مرکز و نیروی کشش سطحی شکل جدید حباب یا قطره ثابت می‌ماند و تغییر نمی‌کند. کشش سطحی مایع-گاز و مایع-مایع از بررسی شکل قطره یا حباب و تعادل نیروهای کشش سطحی و گریز از مرکز برای اولین بار توسط برنارد ونگوت^۱ محاسبه شد [۲۱].

معادله‌ای که رابطه کشش سطحی، نیروی گریز از مرکز و شکل قطره را بیان می‌کند به عنوان معادله ونگوت (معادله (۱۰)) شناخته می‌شود. تحلیل ریاضیاتی کامل قطرات چرخان بعدها توسط پرینسن^۲ و همکاران صورت گرفت [۲۲].

$$\gamma = \frac{r^3 \omega^2 \Delta \rho}{4} \quad (10)$$

که در آن، γ کشش سطحی، r شعاع قطره، ω سرعت زاویه‌ای و $\Delta \rho$ اختلاف چگالی دو فاز مایع یا گاز است.



شکل ۴- شماتیک دو مایع درون یک لوله بسته برای اندازه‌گیری به روش کشش سطحی^۳

این روش تنها محدود به اندازه‌گیری کشش سطحی مایعات با مقادیر کشش سطحی کم‌تر از 50 mN/m است، که می‌توان به آن با توجه به شرایط، هم به عنوان مزیت و هم عیب نگاه کرد. این روش در اندازه‌گیری کشش سطحی بین پلیمرها و مقادیر بسیار کوچک کشش سطحی تا 10^{-6} mN/m مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳، ۲۴]. از دستگاه‌های قطره چرخان ساخته شده دستگاه SITE100 شرکت کروس و M6500 شرکت تجهیزات گریس^۴ را می‌توان معرفی کرد. این روش مانند بسیاری از روش‌های دیگر فقط قادر به اندازه‌گیری کشش سطحی استاتیک است.

۴-۷- فشار حباب پیشینه^۵

این روش بر اساس اندازه‌گیری اختلاف فشار درون و بیرون یک سطح خمیده است که فشار لاپلاس نامیده می‌شود [۲۵]. ارتباط فشار و کشش سطحی به کمک معادله یانگ-لاپلاس برقرار می‌شود.

$$\Delta P = P_{\text{درون}} - P_{\text{بیرون}} = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (11)$$

در این رابطه R_1 و R_2 به ترتیب شعاع داخلی و خارجی انحناى سطح خمیده هستند و γ کشش سطحی است. در استفاده از روش فشار حباب پیشینه، از اختلاف شعاع انحناى داخلی و خارجی حباب صرف نظر می‌شود و رابطه یانگ-لاپلاس به شکل زیر ساده می‌شود.

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad (12)$$

¹ Bernard Vonnegut

² Princen

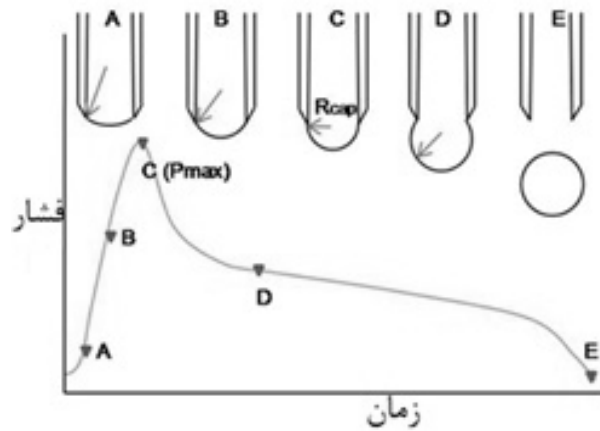
³ برگرفته از وبسایت شرکت کروس، <http://www.kruss.de>

⁴ Grace Instrument

⁵ maximum bubble pressure

معادله (۱۲) اساس اندازه‌گیری کشش سطحی به روش فشار حباب بیشینه است که در آن ΔP اختلاف فشار درون حباب و محیط بیرون، γ کشش سطحی و R شعاع حباب است. این روش که مخترع اولین دستگاه آن، سیمون^۱ است (۱۸۵۱ میلادی)، به این صورت انجام می‌شود که ابتدا نوک لوله موئین درون مایع قرار داده می‌شود و فشار هوا پشت لوله موئین افزایش می‌یابد تا جایی که یک حباب در نوک لوله موئین در داخل مایع تشکیل شود [۲۶]. فشار حباب بیشینه در لحظه ای است که حباب کمترین شعاع خمیدگی را دارد که برابر شعاع داخلی لوله موئین است (شکل ۵). با اندازه‌گیری این فشار و داشتن شعاع لوله موئین، کشش سطحی به راحتی قابل محاسبه است.

از زمانی که سیمون این روش را ابداع کرد، تلاش‌های بسیاری برای بهبود و رفع نواقص آن صورت گرفت [۲۷-۴۳]. یکی از ساده‌ترین اصلاحات صورت گرفته کم کردن فشار هیدرواستاتیک از فشار اندازه گرفته شده است که به سبب فرو بردن لوله موئین در مایع مورد بررسی به وجود می‌آید. اصلاحات دیگری نظیر تاثیر ویسکوزیته و نیروهای آیرودینامیک نیز در این محاسبات وارد شده است که به سادگی قابل محاسبه است [۳۳]. اگر این اصلاحات وارد محاسبات شوند، با دقت بسیار بالایی با استفاده از این روش می‌توان کشش سطحی را تعیین کرد.



شکل ۵- نمودار فشار-زمان حبابی که در سر لوله موئین تشکیل می‌شود.^۲

روش فشار حباب بیشینه بهترین روش برای اندازه‌گیری کشش سطحی دینامیک است. با به کار گیری این روش علاوه بر تعیین مقدار لحظه به لحظه کشش سطحی می‌توان کینتیک و مکانیزم جذب و پاک کنندگی و شناوری و کف کردن و تعادل ترمودینامیکی را مورد بررسی قرار داد [۳۲, ۳۳, ۳۷, ۴۰, ۴۳]. برخی از تولید کنندگان این نوع دستگاه‌ها^۳، شرکت‌های کروس با ارائه BP50 و BP100، سینترفیس^۴ با تولید BPA1S و SITA با ساخت SITA pro line t15، SITA science line t100 و SITA و DynoTester⁺ که دستگاهی کوچک و قابل حمل است، هستند. از معایب این روش می‌توان به محدود بودن رنج اندازه‌گیری کشش سطحی بین ۱۰ تا ۱۰۰ mN/m اشاره کرد. مزایای این روش نسبت به سایر روش‌ها اندازه‌گیری سریع در بازه زمانی کمتر از ثانیه، تعیین کشش سطحی دینامیک و قیمت مقرون به صرفه این دستگاه‌ها با توجه به داشتن امکان اندازه‌گیری کشش سطحی دینامیک است.

۵- مقایسه روش‌ها

هر کدام از روش‌های ذکر شده مزایا و معایب خاص خود را دارد. برخی روش‌ها دقت بالا و برخی دیگر مانند بالا آمدن مایع در لوله موئین، دقت کمی دارند. همه روش‌ها به جز فشار حباب بیشینه، فقط توانایی اندازه‌گیری کشش سطحی استاتیک را دارند.

¹ Simon Ann

² <http://www.kruss.de> برگرفته از وبسایت شرکت کروس

^۳ یک دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی به روش فشار حباب بیشینه در حال طراحی و ساخت در آزمایشگاه سیالات و ترشوندگی پژوهشگاه مواد و انرژی است و به زودی رونمایی خواهد شد.

⁴ Sinterface

روش فشار حباب بیشینه، علاوه بر کشش سطحی استاتیک، کشش سطحی دینامیک را نیز اندازه می‌گیرد. بعضی دستگاه‌ها بسیار سنگین و حجیم هستند و بعضی دیگر کوچک و سبک. تعدادی از روش‌ها با توجه به رنج اندازه‌گیری‌شان بسیار پرکاربرد هستند. در جدول ۲، قیمت دستگاه‌های تجاری که به روش‌های مختلف کار می‌کنند و محصول شرکت‌های متفاوتی هستند، آورده شده است تا پژوهشگران و صنایعی که نیاز به اندازه‌گیری کشش سطحی دارند، با استفاده از اطلاعات موجود در این مقاله و قیمت دستگاه‌ها، مناسب‌ترین دستگاه را تهیه کنند یا خود بتوانند یکی از این دستگاه‌ها را بومی سازی کنند.

جدول ۱- قیمت و تولید کننده‌گان و رنج اندازه‌گیری دستگاه‌های اندازه‌گیری کشش سطحی [۴۴]

روش	نوع دستگاه	تولید کننده	قیمت تقریبی به دلار	رنج اندازه‌گیری mN/m
بالا آمدن مایع در لوله موئین	دستی	Fisher	۷۹	-
ورق ویلهلمی / ورق دو نوی	دستی، تنظیم مکانیکی	Fisher, , CSC, Kahl	۲,۰۰۰-۴,۰۰۰	۱-۱۰۰۰
ورق ویلهلمی / ورق دو نوی	دستی، تنظیم الکتریکی	KSV, Lauda, NIMA	۴,۰۰۰-۱۱,۰۰۰	۱-۲۰۰۰
ورق ویلهلمی / ورق دو نوی	اتوماتیک، تنظیم الکتریکی	Cahn, Kruss, KSV, NIMA	۹,۰۰۰-۲۴,۰۰۰	۱-۲۰۰۰
فشار حباب بیشینه	اتوماتیک	Kruss, Lauda, Sense Dayne	۵,۰۰۰-۲۳,۰۰۰	۱۰-۱۰۰
قطره آویزان یا چسبیده	دستی	Kruss, Rame-Hart	۷,۰۰۰-۱۰,۰۰۰	۰/۰۱-۱۰۰۰
قطره آویزان یا چسبیده	اتوماتیک	ADSA, AST, FTA, Kruss, Rame-Hart, Temco	۱۰,۰۰۰-۱۰۰,۰۰۰	۰/۰۱-۱۰۰۰
وزن / حجم قطره	اتوماتیک	Kruss, Lauda	۱۶,۰۰۰-۲۱,۰۰۰	۰/۱-۱۰۰
قطره چرخان	دستی	Kruss	۲۰,۱۰۰	۱۰ ^{-۶} -۵۰

۶- نتیجه‌گیری

اهمیت دانستن مقدار کشش سطحی برای کاربردهای مختلف در رشته‌هایی نظیر فیزیک، شیمی، متالورژی، مهندسی شیمی، نساجی، مهندسی مواد بویژه سرامیکها، اجرام متخلخل، بیومواد و غیره برای تعیین تاثیر سورفاکتانت، رفتار ترشوندگی داروها و رنگ‌ها، ترشوندگی و چسبندگی پوشش‌ها، منسوجات و جوهر، بررسی اصلاحات صورت گرفته روی سطح، تایید نظافت در صنایع غذایی، بهینه‌سازی فرایندهای رنگ‌رزی، اسپری و چاپ، کنترل کیفیت محصولات، تعیین مقدار سورفاکتانت در فرایند تهیه سرامیک‌ها، حمام‌های گالوانیک و حمام‌های تمیز کردن، تولید غذا، بازیافت روغن، توسعه امولسیون‌ها و بررسی زیست‌سازگاری داروها ایجاب می‌کند تا کشش سطحی با دقت و سرعت بالا اندازه‌گیری شود.

اندازه‌گیری مقدار کشش سطحی مایع-مایع و مایع-گاز امروزه از طرق مختلف امکان پذیر است. در همه روش‌ها تلاش شده است تا با یافتن ارتباط کشش سطحی و پدیده‌های فیزیکی، با کم‌ترین خطا، مقدار دقیق کشش سطحی را تعیین کرد. البته هر روش، خطاهایی دارد که پژوهشگران آن خطاها را یافته و اصلاح کرده‌اند؛ در نتیجه، امروزه دستگاه‌های مختلف می‌توانند با دقت بسیار بالایی مقدار کشش سطحی را با خطای بسیار کم، محاسبه کنند. هر روش مزایا و معایب مختص به خود را دارد که محقق با اطلاعات داده شده باید بهترین روش را برای تعیین کشش سطحی مایع مورد نظر خود انتخاب کند. هر کدام از روش‌های ذکر شده در تعیین مقدار کشش سطحی محدودیت خاص خود را دارد؛ هم در دقت و هم در محدوده اندازه‌گیری. برخی روش‌ها دقت بالا و برخی دقت کم‌تری دارند؛ بعضی دامنه وسیع و بعضی دیگر محدوده باریکی را پوشش می‌دهند. البته قیمت هر دستگاه را نیز باید مد نظر قرار داد تا با کم‌ترین هزینه، بهترین نتیجه به دست آید.

مراجع

- [1] Brewster. D, "Edinburgh Encyclopaedia", Joseph and Edward Parker, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A., Vol.10, PP.805-823, 1832.
- [2] Libri. G, "History of the mathematical sciences in Italy from the Renaissance until the end of the

- seventeenth century", Jules Renouardet. cie, Vol.3, PP.54, 1840.
- [3] Rossiter B.W and Baetzold. R.C (Eds), "Physical methods of chemistry", Wiley, U.S.A, Vol.2, PP.20, 1993.
- [4] Myers. D, "Surfaces, Interfaces And Colloids" 2nd edition. Wiley & Sons, U.S.A, PP.10, 1999.
- [5] Ebnesajjad. S and Ebnesajjad. C, "Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding", William Andrew, PP.8-9, 2014.
- [6] Pellicer. J, Manzanares. J. A, and Mafe'. S, "The physical description of elementary surface phenomena: Thermodynamics versus mechanics", Am. J. Phys. Vol.63, PP.542-547, 1995.
- [7] Lando. J.L and Oakley. H.T, "Tabulated correction factors for the drop-weight-volume determination of surface and interracial tensions", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.25, PP.526-530, 1967.
- [8] Harkins. W.D and Brown. F.E, "The ditermination of surface tension (free surface energy) and the weight of falling drops: The surface tension of water and benzene by the capillary height method", J. Am. Chem. Soc., Vol.41, PP.499-524, 1919.
- [9] Wilhelmy. L, "The dependence of capillaris constant of alcohol of substance on shape of the wetted solid body", Annalen der Physik und Chemie, Vol.119, PP.177-217, 1863 (in German).
- [10] Lecomte du Noüy. P, "A New Apparatus For Measuring Surface Tension", J Gen Physiol, Vol.1(5), PP.521-524, 1919.
- [11] Harkins. W.D. and Jordan. H.F, "a method for determination of surface and interfacial tension from the maximum pull on a ring", J. Am. Chem. Soc, Vol.52(5), PP.1751-1772, 1930.
- [12] Jůza. J, "The pendant drop method of surface tension measurement: equation interpolating the shape factor tables for several selected planes", Czechoslovak Journal of Physics, Vol.47, PP.351-357, 1997.
- [13] Paddy. J.F, Surface and Colloid Science; Wiley, U.S.A. New York, Vol.1, PP.103, 1969.
- [14] Ambwani. D.S, Fort. T.J, "Pendant Drop Technique for Measuring Liquid Boundary Tensions"; Surface and Colloid Science, Vol.11, PP.93-119, 1979.
- [15] Butler J.N and Bloom. B.H, "A curve-fitting method for calculating interfacial tension from the shape of a sessile drop" Surface Science, Vol.4(1), PP.1-17, 1966.
- [16] Kwok D.Y. et al., "Contact Angle Measurements and Contact Angle Interpretation. 1. Contact Angle Measurements by Axisymmetric Drop Shape Analysis and a Goniometer Sessile Drop Technique", Langmuir, Vol.10(13), PP.2880-2894, 1997.
- [17] Rienstra. S.W, "The shape of a sessile drop for small and large surface tension", Journal of Engineering Mathematics, Vol.24(3), PP.193-202, 1990.
- [18] Río. O.I and Neumann. A.W, "Axisymmetric Drop Shape Analysis: Computational Methods for the Measurement of Interfacial Properties from the Shape and Dimensions of Pendant and Sessile Drops", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.196(2), PP.136-147, 1997.
- [19] Stalder. A.F. et al., "Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol.364 PP.72-81, 2010.
- [20] Ziesing. G.M, "The Determination of Surface Tension by Sessile Drop Measurements, with Application to Mercury", Australian Journal of Physics, Vol.6(1), PP.86-95, 1953.
- [21] Vonnegut B., "Rotating Bubble Method for the Determination of Surface and Interfacial Tensions", Review of Scientific Instruments, Vol.13(1), PP.6-9, 1942.
- [22] Princen. H.M, Zia. I.Y.Z and Mason. S.G, "Measurement of interfacial tension from the shape of a rotating drop", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.23(1), PP.99-107, 1967.
- [23] Hu. H.H and Joseph. D.D, "Evolution of a Liquid Drop in a Spinning Drop Tensiometer", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.162(2), PP.331-339, 1994.
- [24] Verdier. C. et al., "High temperature interfacial tension measurements of PA6/PP interfaces compatibilized with copolymers using a spinning drop tensiometer", Polymer, Vol.41(17), PP.6683-6689, 2000.
- [25] Butt. H.J, Graf. K, Kappl. M, "Physics and Chemistry of Interfaces", Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Germany, Berlin, PP.8-10, 2003.
- [26] Simon. M, "Research on capillarity", Chim. Phys, Vol.32, PP.5-29, 1851. (in French).
- [27] Adam. N.K and Shute. H.L, "Anomalies in the surface tension of paraffin chain salts", Trans. Faraday SOC, Vol.34, PP.758-765, 1938.
- [28] Austin. M, Bright. B.B and Simpson. E.A, "The measurement of the dynamic surface tension of manoxol OT solutions for freshly formed surfaces", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.23, PP.108-112, 1967.
- [29] Fainerman. V.B and Lylyk. S.V., "Dynamic surface-tension and kinetics of adsorption in solutions of normal alcohols", Colloid journal of the USSR, Vol.44, PP.538-544, 1982.
- [30] Bendure. R.L, "Dynamic surface tension determination with the maximum bubble pressure method", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.35, PP.238-248, 1971.
- [31] Fainerman. V.B, "Kinetics of adsorption of ionic surfactants at the solution-air interface and the nature of the adsorption barrier" Colloids and Surfaces, 57(2) (1991) 249-266.
- [32] Fainerman. V.B and Miller. R, "Maximum bubble pressure tensiometry an analysis of experimental constraints", Advances in Colloid and Interface Science, Vol.108, PP.287-301, 2004.
- [33] Fainerman. V.B. et al., "Correction for the Aerodynamic Resistance and Viscosity in Maximum Bubble Pressure Tensiometry", langmuir, Vol.20, PP.1721-1723, 2004.
- [34] Kloubek. J, "Measurement of the dynamic surface tension by the maximum bubble pressure method", Tenside, Vol.5, PP.317-323, 1968 (in German).
- [35] Kloubek. J, "Measurement of the dynamic surface tension by the maximum bubble pressure method. II.

- Calculation of the effective age of the solution-air interface", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.41, PP.1-6, 1972.
- [36] Kloubek. J, "Dynamic surface tension of foaming solutions and dispersions", Colloid and Polymer Science, Vol.253, PP.754-759, 1975.
- [37] Koval'chuk. V.I. et al., "Hydrodynamic processes in dynamic bubble pressure experiments. 4. Calculation of magnitude and time of liquid penetration into capillaries", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol.151(3), PP.525-536, 1999.
- [38] Kragh. A.M, "Effect of gelatin and salts on the dynamic surface tension of manoxol OT", Transactions of the Faraday Society, Vol.60, PP.225-232, 1964.
- [39] Kuffner.R.J, "The measurement of dynamic surface tensions of solutions of slowly diffusing molecules by the maximum bubble pressure method", Journal of Colloid Science, Vol.16,PP.497-500, 1961.
- [40] Mishchuk. N.A. et al., "Hydrodynamic processes in dynamic bubble pressure experiments Part 5. The adsorption at the surface of a growing bubble", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol.192, PP.157-175, 2001.
- [41] Walker. T, Abbott-Klostermann. T, Narayanan.P and Sharma. V, "Maximum bubble pressure tensiometry and foamability", Bulletin of the American Physical Society, Vol.1, PP.14, 2014.
- [42] Reh binder, P.Z, "Dependence of surface activity and surface tension of solutions upon temperature and concentration", Z. Phys. Chem, Vol.111,PP.447-464, 1924.
- [43] Kovalchuka.V.I and Dukhin. S.S, "Dynamic effects in maximum bubble pressure experiments", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol.192,PP.131-155, 2001.
- [44] Webster. J.G and Eren. H, "Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook Spatial, Mechanical, Thermal and Radiation Measurement", 2nd edition, Taylor and Francis Group, U.S.A., PP.47-6, 2013.



h-majidian@merc.ac.ir

دکتر هودسا مجیدیان، نویسنده
مسئول مقاله، عضو هیات علمی
پژوهشگاه مواد و انرژی

اندازه‌گیری آنلاین خوردگی دیرگداز کوره با استفاده از تغییرات دما

هودسا مجیدیان^{۱*}، علیرضا شالبافی^۲، لیلا نیکزاد^۱

^۱ پژوهشگاه مواد و انرژی

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

چکیده: خوردگی یکی از مهم‌ترین مکانیزم فرسایش دیرگداز در کوره‌ها است که موجب ساییده و کنده شدن پوشش دیرگداز و ورود آن به مذاب می‌شود. آزمون‌های زیادی وجود دارد که با آنها می‌توان مقدار خوردگی یا فرسایش دیرگداز را تخمین زد؛ ولی نتایجی که از آزمون‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید، بسیار متفاوت از شرایط واقعی است؛ روش‌هایی که در پژوهش‌ها و مطالعات به چشم می‌خورد بیشتر جنبه آزمایشگاهی داشته و در ایران نیز در مورد اندازه‌گیری خوردگی نسوز در حالت گرم یا هنگامی که کوره در حال کار است، گزارش‌شده نشده است. اندازه‌گیری مقدار خوردگی دیرگداز کوره از موضوعات تحقیقاتی بسیار مهم روز در صنعت فولاد است و هدف اصلی آن توسعه دیرگدازها در صنعت و به دست آوردن طول عمر مفید آنها است تا بتوان قابلیت کار کوره را با کمترین هزینه در هر تن تولید فولاد افزایش داد. روش‌های اندازه‌گیری خوردگی در حالت گرم می‌تواند بر اساس دما، هدایت الکتریکی، مشاهده چشمی، استفاده از امواج و ... باشد. در این میان روش اندازه‌گیری بر اساس دما، روشی ساده، کم هزینه و مقرون به صرفه است که نیاز به تجهیزات پیچیده ندارد و برای بیشتر کوره‌ها قابل اعمال است. در این مطالعه تلاش شد تا به روش‌های اندازه‌گیری خوردگی دیرگداز در کوره توسط اندازه‌گیری دما اشاره شود.

کلمات کلیدی: خوردگی، اندازه‌گیری آنلاین، ترموکوپل، دیرگداز

۱- مقدمه

کوره‌های متالورژی به طور معمول از یک پوسته‌ی فلزی با آستر آجر دیرگداز ساخته می‌شوند. عمر آجر برابر است با مدت زمانی که می‌توان عملیات مورد نظر را با کوره انجام داد. هر چقدر عمر نسوز بیشتر باشد، هزینه‌ها پایین‌تر و بهره‌وری کوره بالاتر می‌رود. اندازه‌گیری خوردگی آجر و پیش‌بینی ضخامت باقیمانده آن یکی از دغدغه‌های روزمره صنعتگران تولید فولاد است. سیستم‌ها و روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری خوردگی و ضخامت پوشش با استفاده از اندازه‌گیری دما تحقیق و معرفی شده است. از حدود ۵۰ سال پیش مقالات و ثبت اختراعاتی در مورد این روش به ثبت رسیده است. در این مقاله به روش‌هایی اشاره می‌شود که با استفاده از اندازه‌گیری مقدار اولیه، متوسط و یا اختلاف دما توسط ترموکوپل‌های نصب شده در دیوار کوره و سپس انجام محاسبات، مقدار خوردگی محاسبه می‌شود. قدمت این روش به دهه ۱۹۶۰ برمی‌گردد و اخیراً نیز استفاده از آن در مقالات و صنعت گزارش شده است. گرچه این روش ساده و ابتدایی است ولی به نسبت کم هزینه بوده و قابلیت تجاری شدن را دارد. به عنوان مثال از این روش برای مانیتور کردن فرسایش دیرگداز و لوله در شرکت فلز بری^[۱] و سیووی^[۲] استفاده شده است.

قابل ذکر است که برای اندازه‌گیری خوردگی چندین روش وجود دارد؛ مانند استفاده از ترموکوپل و تعیین دما، استفاده از شاخص‌های الکتریکی و چشمی، استفاده از دستگاه‌های لیزر، مایکروویو، امواج صوتی و ترموگرافی. در ادامه به انواع وسایل اندازه‌گیری خوردگی آجر کوره با ترموکوپل‌ها اشاره می‌شود.

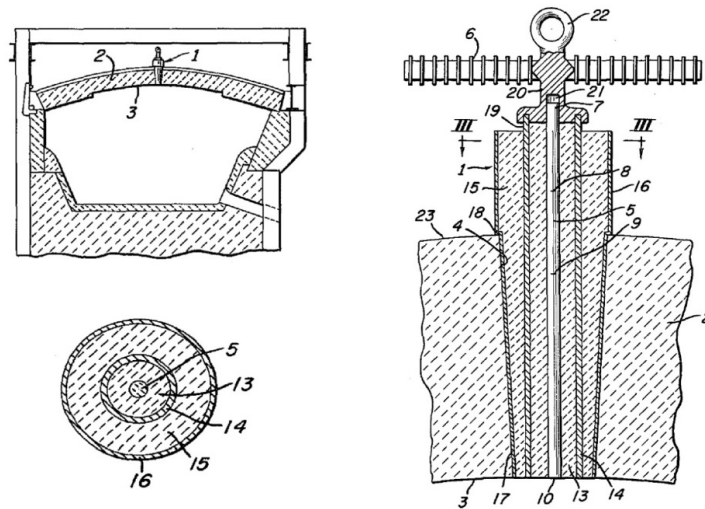
¹ Berry Metal Company

² SAVEWAY® system

۲- استفاده از پایرومتر ترموالکتریک

شاید بتوان اولین مبحث یافت شده و قابل دسترس در این زمینه را مربوط به ثبت اختراعی در سال ۱۹۶۲ با عنوان دستگاه اندازه‌گیری ضخامت و دمای آستر کوره مربوط دانست [۳]. این اختراع در مورد سیستم ترموالکتریکی برای اندازه‌گیری دما و ضخامت دیوار دیرگداز در کوره‌های متالورژی است (شکل ۱). این سیستم یک پایرومتر ترموالکتریک (۱) بوده که باید در سقف کوره (۲) قرار داده شود تا دمای سطح داخلی کوره (۳) را اندازه‌گیری کند. این پایرومتر دارای یک بدنه (۵) و یک رادیاتور (۶) برای نشر گرما از انتهای خارجی (۷) به اتمسفر و برای حفظ دمای انتهایی (۷) در مقداری ثابت و پایین‌تر نسبت به دمای مورد تحقیق است. همچنین یک مدار ترموکوپل و یک پتانسیومتر به همراه آن وجود دارد که دمای نقاط (۸) و (۹) را در راستای بدنه (۵) تعیین می‌کند تا ولتاژ ناشی از گرادیان دما میان انتهای بالایی (۷) و انتهای پایینی یا داخلی (۱۰) مشخص شود. این ولتاژ به یک وسیله ثبت کننده (۱۱) وارد می‌شود که به منبع انرژی A.C. وصل است تا دمای انتهای (۱۰) بدنه (۵) را تعیین کند. بدنه و دیگر اجزای سیستم باید از موادی باشند که تحت شرایط کوره با همان نرخ خوردگی دیواره کوره خورده شوند. در دماهای کاری بالا، بدنه باید از مواد دیرگداز مانند کاربیدسیلیسیم تهیه شود.

برای ثابت ماندن سیستم، لبه‌های (۱۸) آن در مکان نصب (۴) به شکل ویژه‌ای طراحی شده‌اند. در شکل ۱ سطح مقطع نشان می‌دهد که بدنه به شکل میله استوانه‌ای با پوششی از ماده عایق دیرگداز حرارت (۱۳) و در پوسته داخلی کاربیدسیلیسیم (۱۴) قرار می‌گیرد. برای عایق کاری و استحکام بیشتر، لایه دیگری از ماده عایق حرارت (۱۵) با پوسته خارجی کاربیدسیلیسیم (۱۶) نیز به دور آن قرار می‌گیرد.

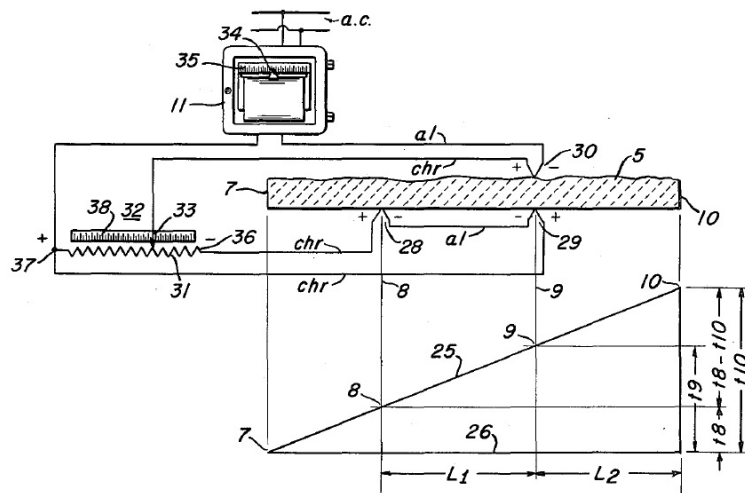


شکل ۱- شاخص اندازه‌گیری و سطح مقطعی از کوره و شاخص پایرومتر [۳]

شکل ۲ کوپل‌های کروم-آلوم (۲۸، ۲۹ و ۳۰) متناظر با نقاط (۸) و (۹) را نشان می‌دهد که باید در فاصله‌ای معین نسبت به انتهای (۱۰) و نسبت به یکدیگر قرار داشته باشند. این کوپل‌ها در یک مدار سری با مقاومت (۳۱) و پتانسیومتر (۳۲) و در مداری با کوپل (۳۰) و نمایشگر (۱۱) هستند. مقاومت (۳۳) از ولتاژ $(t_8 - t_9)$ انرژی می‌گیرد که ناشی از اختلاف دمای این نقاط است. هر تغییری در دما یا حرارت در انتهای (۱۰) موجب تغییرات گرادیان دمای میله میان انتهای (۷) و (۱۰) می‌شود. در شکل ۲ خط (۲۵) گرادیان دمایی میان انتهای (۷) و (۱۰)، و خط افقی (۲۶) طول آن را نشان می‌دهد. دمای نقاط (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) با نماد t و زیرنویس، و فاصله میان نقاط (۸) و (۹) با حرف L نشان داده شده‌اند که رابطه مثلثاتی میان آن‌ها در شکل نمایان است. ولتاژی که به (۱۱) می‌رسد نسبت مستقیمی با تغییرات دما در انتهای (۱۰) دارد؛ سیم (۳۳) نیز از روی نسبت L_2/L_1 در موقعیتی در راستای مقاومت (۳۱) تنظیم می‌شود. پس دما در (۱۰) بر حسب دما در (۸) و (۹) تعریف می‌شود:

$$t_{10} = t_9 + \frac{L_2}{L_1}(t_9 - t_8) \quad (1)$$

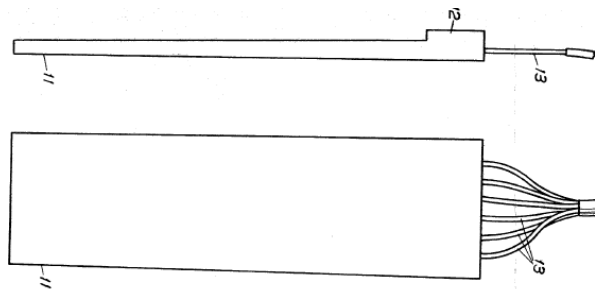
با روی دادن خوردگی، نسبت L_2/L_1 کم می‌شود و خوانده‌های دمایی (۱۱) از دمایی واقعی (۱۰) بیشتر می‌شود.



شکل ۲- مدار پتانسیومتر، ترموکوپل و گراف نشان دهنده گرادیان دمایی قطعه [۳]

۳- استفاده از صفحه نازک با کانداکتورهای فلزی

در سال ۱۹۷۰ قطعه‌ای معرفی شد که باید در میان آجرهای دیوار کوره نصب می‌شد [۴]. این وسیله یک صفحه نازک از ماده‌ای مقاوم به گرما بود و درون آن کانداکتورهای فلزی قرار داشت که باید یک سر آن‌ها به سطح بیرونی کوره و سر دیگر در نقاطی در فواصل مختلف درون کوره قرار می‌گرفت. در این اختراع گزارش شده هنگامی که کوره در حال ساخت است، می‌توان قطعه را در برخی نقاط مد نظر میان آجرهای کوره قرار داد به طوریکه سر آزاد آن در تماس با دیوار داخلی کوره باشد. حتی می‌توان این وسیله را با اتصال محکمی میان دو آجر کوره قرار داد بدون آنکه خواص کف یا سقف کوره تضعیف شود. برای نصب این وسیله در هر جای کوره نیازی به سوراخ کردن و استفاده از غلاف محافظ نیست. با این قطعه می‌توان به طور پیوسته دمایی کوره و ضخامت دیوار را اندازه‌گیری کرد. این وسیله می‌تواند از یک ماده سینتر شده و یا سینتر نشده باشد که در این صورت، در هنگام گرم شدن کوره سینتر آن به طور همزمان روی می‌دهد (شکل ۳).



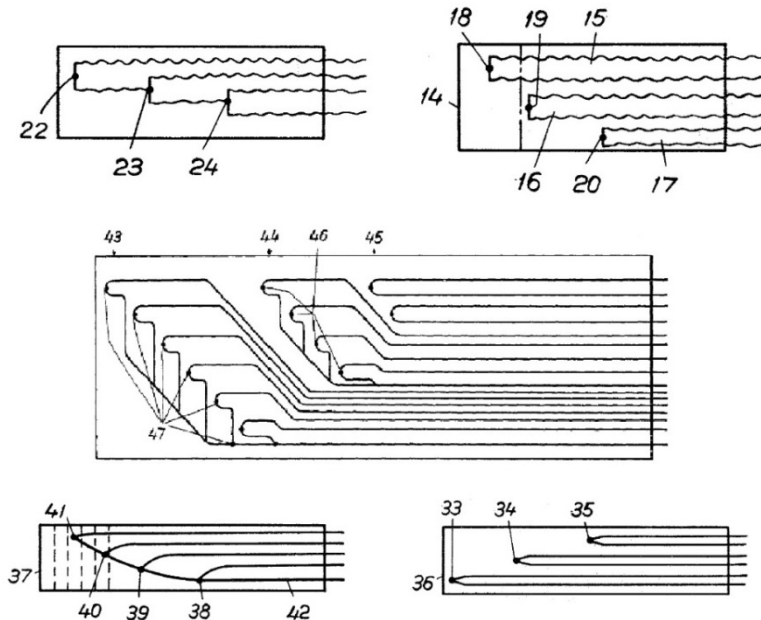
شکل ۳- تصویر قطعه اندازه‌گیری کننده از بالا و از جانب [۴]

قطعه اندازه‌گیری کننده (شماره ۱۱ در شکل ۳) می‌تواند از جنس آلومینا باشد و دارای بخشی به نام پاشنه (۱۲) است تا نصب آن آسان‌تر شود. ترکیب کانداکتورها می‌تواند از جنس پلاتین-رودیموم با نسبت‌های مختلفی مانند ۵-۹۵، ۲۰-۸۰ و ۴۰-۶۰ باشد. با این ساختار دقت بالایی حاصل می‌شود. کانداکتورهای فلزی (۱۳) به ترموالمان‌ها یا نقاط عایق شده وصل‌اند. ترموالمان‌ها برای اندازه‌گیری دما و ضخامت دیوار و نقاط عایق شده تنها برای اندازه‌گیری ضخامت دیوار است. تعداد و مکان‌های نصب این قطعات دلخواه و بر حسب نیاز است. شکل قطعه معمولاً مستطیل بوده ولی به می‌توان آن را به اشکال دوزنقه موازی، چندوجهی با گوشه‌های کمی گرد نیز تهیه کرد.

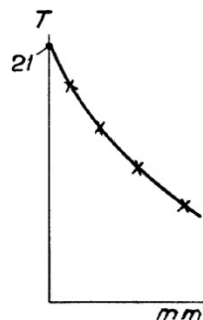
در شکل ۴ قطعه اندازه‌گیری کننده با سه ترموالمان (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) دیده می‌شود که نقاط تماس آن‌ها (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) در

فواصل مختلف از انتهای (۱۴) در مذاب قرار می‌گیرد. وقتی قطعه نصب شود، ترموالمان‌ها مقادیر مختلفی از دما را نشان می‌دهند که با برون یابی مانند شکل ۵ دمای مذاب قابل محاسبه است. با اندازه‌گیری مقاومت میان کانداکتورهای دو ترموالمان مختلف، می‌توان ضخامت دیوار را تعیین کرد. وقتی دیوار خورده می‌شود (خط چین) مقدار کنتور تغییر کرده و به تدریج اندازه‌گیری دما در نقطه تماس (۱۸) ناپدید می‌شود ولی در نقاط (۱۹) و (۲۰) به طور پیوسته ادامه خواهد داشت. شکل ۴ طراحی‌های متنوع از این اختراع را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از شکست کانداکتورها به خاطر اختلاف ضریب انبساط طولی، می‌توان آن‌ها را به شکل‌های موجی، اسپیرال یا زیگزاگ بافت یا به صورت سیم، نوار و غیره باشند. در شکل ۴ یک قطعه دیگر نشان داده شده است که در آن یک کانداکتور در هر ترموالمان (۲۲، ۲۳ و ۲۴) به ترموالمان‌های بعدی یا نزدیک نقاط تماس (نقاط soldering) وصل می‌شود. در پایین شکل ۴، چهار نقطه اندازه‌گیری ترموالمان (۳۸-۴۱) در فواصل مختلف از انتهای آزاد ۳۷ روی یک کانداکتور ۴۲ قرار گرفته‌اند.

در شکل ۴ وسط تعداد زیادی ترموالمان در ردیف‌های مختلف ۴۳، ۴۴ و ۴۵ قرار گرفته‌اند که کانداکتورهای ثانویه ۴۶ و ۴۷ را دارند. در این حالت دقت اندازه‌گیری بسیار بالا است زیرا ترموالمان‌ها در هر سانتیمتر از آجر قرار دارند و اندازه‌گیری پیوسته‌ای از ضخامت دیواره را نشان می‌دهند.



شکل ۴- ترموالمان‌های متعدد قطعه اندازه‌گیری کننده جایگزین‌های دیگر آن [۴]

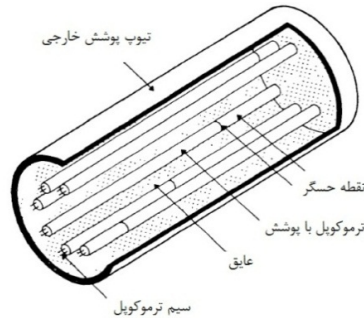


شکل ۵- گراف دمایی المان‌ها با برون‌یابی [۴]

شکل ۵ دماهای اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف در شکل ۴ را نشان می‌دهد و شماره ۲۱ مقدار برون‌یابی محاسبه شده برای دمای مذاب در شروع کار است. وقتی قطعه خورده شود، مقادیر اندازه‌گیری شده ترموالمان‌ها افزایش می‌یابد. برون‌یابی، تغییرات دما و در نتیجه ضخامت دیواره می‌تواند مستقیماً با کمک کامپیوتر نشان داده شود.

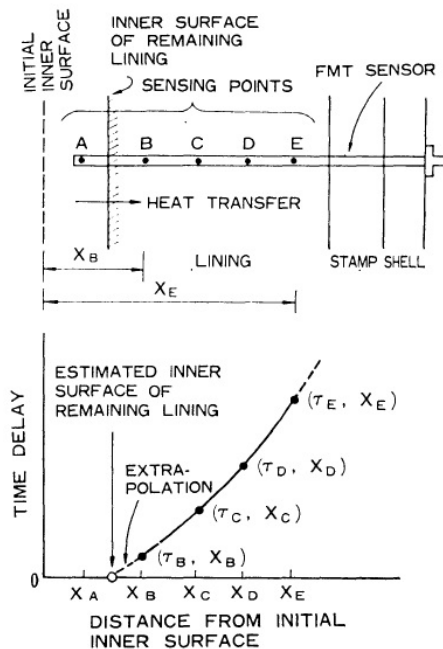
۴- استفاده از سیستم ترموکوپل چندگانه

در ثبت اختراعی در سال ۱۹۸۲ و مقاله‌ای در سال ۱۹۸۴، به روشی بر اساس سنسور ترموکوپل چندگانه (FMT) با روش تحلیل^۱ سیگنال‌های سنسور برای تخمین مقدار خوردگی دیرگداز اشاره و در کوره دمش کوب^۲ استفاده شده است [۵و۶]. سنسور FMT (شکل ۶) می‌تواند به طور همزمان تغییرات دما را در چند نقطه اندازه‌گیری کند. ترموکوپل‌ها که در غلاف‌هایی قرار دارند، به صورت موازی و همراستا با یکدیگر آرایش می‌یابند. سنسورها نیز به گونه‌ای قرار گرفته‌اند تا شار گرما در سراسر طول آن بکناخت بماند.



شکل ۶- شماتیک سنسور FMT [۵]

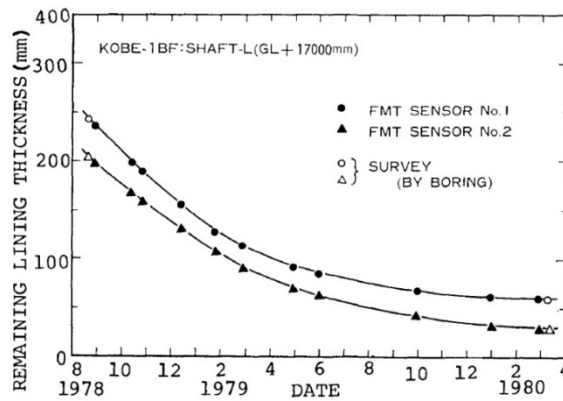
این روش بر اساس تأخیر انتقال تغییرات دما در دیرگداز است. هنگامی که سیگنال تریگر، T_i ، که نشان دهنده تغییرات گرما در کوره است، به آجر منتقل شود، تغییرات دما که به آن سیگنال پاسخ گفته می‌شود، T_{ii} ، مطابقاً در هر نقطه در آجر پس از یک تأخیر زمانی T_t ، که به فاصله از سطح داخلی X_i بستگی دارد منتقل می‌شود. بنابراین اگر سنسور در آجر نصب شود (شکل ۷)، و تأخیر زمانی T_t (میان سیگنال تریگر)، T_i و سیگنال پاسخ T_{ii} ، و در هر نقطه X_i در پوشش محاسبه شود، می‌توان مقدار باقیمانده آجر را با برون‌یابی منحنی $T-X$ تخمین زد. از آنجایی که روش پاسخ تریگر تنها بر اساس روابط میان سیگنال‌های آجر است، تخمین ضخامت آجر تحت تأثیر تغییرات متوالی خواص فیزیکی آن در حین کار کوره نخواهد بود. شکل ۸ تغییرات متوالی ضخامت باقیمانده آجر کوره کوب را که با این روش اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.



شکل ۷- اصول روش پاسخ تریگر [۵]

¹ Trigger Response Method

² No. 3 blast furnace of Kobe Works



شکل ۸- تغییرات ضخامت آجر که با روش پاسخ تریگراندازه‌گیری شده است [۵]

۵- اندازه‌گیری خوردگی با استفاده از تغییرات دمای درون و بیرون کوره

در سال ۱۹۸۳ در مقاله‌ای [۷] به روش ساده و در دسترس برای مانیتور کردن مقدار خوردگی دیرگداز یک کوره ذوب شیشه اشاره شد که شامل اندازه‌گیری پیاپی دمای سطوح داخلی و خارجی دیرگداز و رسم منحنی وابستگی دمای سطح خارجی به ضخامت آن در دماهای مختلف سطح داخلی است. با اندازه‌گیری دمای بیرونی، تغییرات ضخامت دیواره و در نتیجه، مقدار خوردگی آن را می‌توان بر اساس این گراف به دست آورد. سنسور دما بر دیواره داخلی دیرگداز، یک ترموکوپل است. یک پرینتر الکترونیکی نیز برای این روش نیاز است. دمای سطح خارجی نیز با استفاده از یک پروب حرارتی (ترموکوپل) اندازه‌گیری می‌شود. گراف مورد نظر با استفاده از فرمول حرارت عبور کرده از یک دیوار تک لایه با یک شار گرمایی حالت پایدار به دست می‌آید. دمای دیواره خارجی t_{ext} بر حسب درجه سانتیگراد می‌شود:

$$t_{ext} = t_a + q \frac{1}{\alpha_2} \quad (2)$$

که t_a دمای هوای اطراف بر حسب درجه سانتیگراد، q شار گرما از واحد سطح دیوار بر حسب W/m^2 و α_2 ضریب نشر گرما بر حسب $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ است.

شار گرما در یک رژیم حالت پایدار برای یک دیواره تک لایه با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

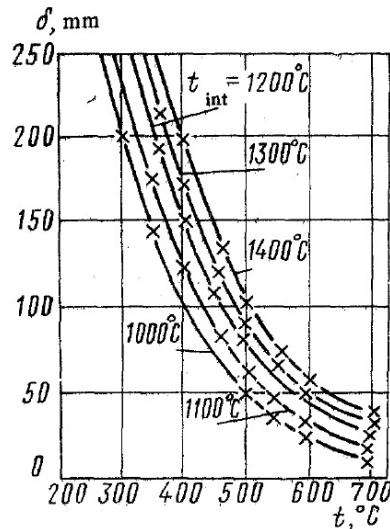
$$q = \frac{t_{int} - t_a}{(\delta/\lambda) + (1/\alpha_2)} \quad (3)$$

که δ ضخامت دیوار (m)، t_{int} دمای دیواره داخلی ($^\circ C$) و λ هدایت حرارتی ماده ($W/(m \cdot ^\circ C)$) است. با جایگزین کردن مقدار q در رابطه ۲ و انجام یک تغییر، می‌توان فرمولی را برای تعیین ضخامت دیواره بر حسب دمای درونی و بیرونی آن با در نظر داشتن دمای هوای اطراف آن به دست آورد:

$$\delta = \left(\frac{(t_{int} - t_a) \frac{1}{\alpha_2}}{t_{ext} - t_a} - \frac{1}{\alpha_2} \right) \lambda \quad (4)$$

این فرمول برای ترسیم گراف (شکل ۹) استفاده می‌شود.

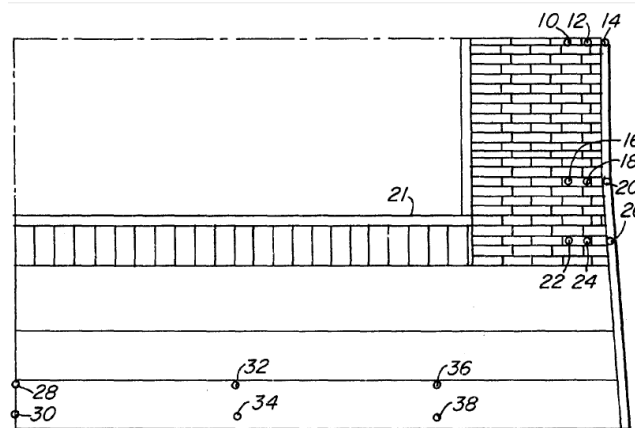
اگر مخزن کوره ذوب شیشه از دیرگدازهای مختلفی تهیه شده و چند لایه باشد، محاسبه گرمایی که از دیواره مخزن کوره خارج می‌شود، برای یک دیوار چند لایه انجام خواهد شد. این روش ویژه برای مانیتور کردن فرایند خوردگی در مخزن کوره تانکی نوع بیچ بوده که از بلوک‌های کوارتز ساخته شده باشد. اندازه‌گیری ضخامت بلوک‌ها هنگامی که کوره در حال کار نبود، نشان داد که این روش بسیار دقیق بوده است. بر اساس روش محاسباتی مذکور، ضخامت دیرگداز در ناحیه کف مخزن ۱۴۰-۱۳۵ میلی‌متر به دست آمد که ضخامت واقعی ۱۵۰-۱۳۰ میلی‌متر بوده است؛ یعنی مقدار خطا در حدود ۵-۱۰٪ بود.



شکل ۹- وابستگی ضخامت یک بلوک کوارتز به دمای سطوح خارجی آن [۷]

۶- استفاده از ترموکوپل‌های متعدد و مدل انتقال حرارت

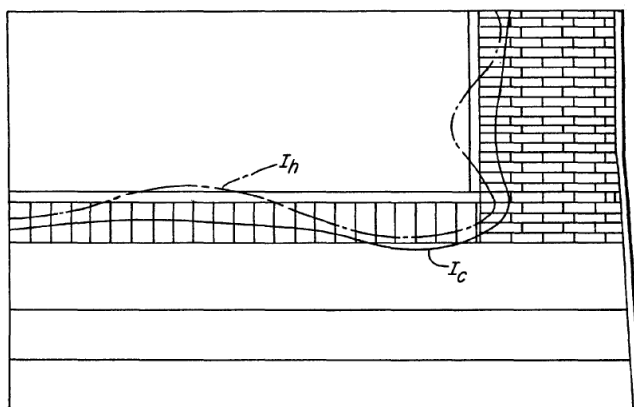
در سال ۱۹۹۹ طی اختراعی [۸] روشی برای افزایش عمر آستر نسوز کوره بلند و برای محاسبه میزان فرسایش آستر نسوز و همچنین تعیین ضخامت لایه‌ی اسکال فلزی تشکیل شده بر سطح داخلی نسوز گزارش شد. با این روش ضخامت لایه تشکیل شده (اسکال)، وجود شکاف بین آستر نسوز و پوسته‌ی فلزی و مکان شکاف مشخص می‌شود. در این روش ترموکوپل‌های متعددی در آستر نسوز قرار داده می‌شود و در بازه‌های زمانی معینی در حین کار کوره، متوسط دمای فرستاده شده از ترموکوپل ثبت می‌شود. سپس بر اساس نتایج حاصل از محاسبات، اقداماتی برای رفع مشکلات صورت می‌گیرد. ترموکوپل‌های اندازه‌گیری دما ترجیحاً روی پوسته‌ی فلزی و نسوز کوره در قسمت دهانه جاسازی می‌شوند (شکل ۱۰)؛ ترموکوپل‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۴. دومین گروه از ترموکوپل‌ها (۱۶، ۱۸ و ۲۰) در موقعیتی عمود نسبت به گروه اول قرار می‌گیرند. مکان دیگر ترموکوپل‌ها نیز در شکل ۱۰ دیده می‌شود و فاصله آنها از هم در حدود ۴ اینچ (۱۰ سانتیمتر) می‌باشد. بهتر است ترموکوپل‌ها در محیط‌هایی که بطور بالقوه بالاترین سایش را دارند قرار داده شوند.



شکل ۱۰- مقطع عرضی از نصف یک کوره‌ی فولاد سازی با چیدمان ترموکوپل‌ها بر آجر و پوشش فلزی [۸]

در این روش که پیشرفته‌تر از روش‌های پیشین است، محاسبه مراتب انتقال دما توسط کامپیوتر انجام می‌گیرد. دماهای خوانده شده از ترموکوپل‌ها به عنوان داده (دیتا) به کامپیوتر داده می‌شود. کامپیوتر متوسط و حداکثر دمای برگرفته از ترموکوپل‌ها را در مدل انتقال حرارت جایگذاری می‌کند تا شار حرارتی به دست آید. سپس یک مدل انتقال یک بعدی هم برای یک کوره بلند محاسبه می‌کند؛ این مقدار به عنوان نخستین مرز در یک مدل انتقال گرمای دو بعدی محسوب می‌شود. برنامه انتقال گرمای دو

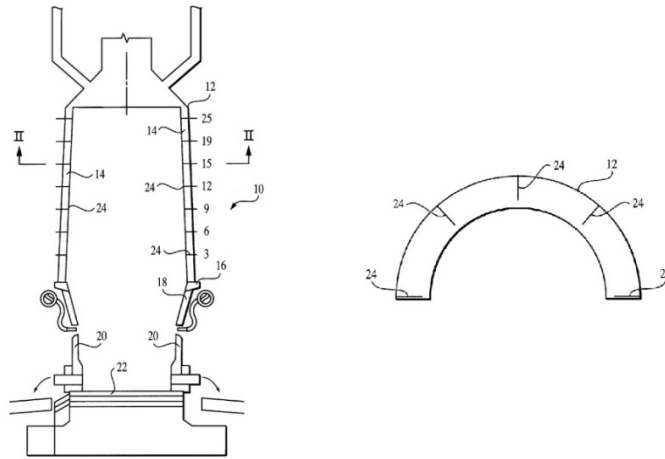
بعدی تکرار می‌شود تا مرز نهایی با به حداقل رساندن تفاوت بین دماهای اندازه‌گیری شده و پیش بینی شده در هر نقطه اندازه‌گیری تعیین شود. با استفاده از متوسط و حداکثر دما، دو ایزوترم رابط با نام‌های I_h و I_c تعیین می‌شود که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. رابط I_h نسبت به رابط I_c به طرف داغ نزدیک‌تر است. رابط I_c که به طرف سرد نزدیک‌تر است میزان خوردگی نسوز را نشان می‌دهد، در حالی که I_h نشانگر تشکیل اسکال بین فلز داغ و نسوز می‌باشد. فاصله بین I_c و I_h ضخامت اسکال را نشان می‌دهد. حضور اسکال، آستر را از برخورد مستقیم فلز داغ محافظت می‌کند و در نتیجه طول عمر کوره بیشتر می‌شود. به طور کلی حداکثر دمای خوانده شده برابر با کمترین ضخامت جرم نسوز می‌باشد و هرگاه متوسط دمای خوانده شده از ترموکوپل به حداکثر دما نزدیک شود ($I_c \sim I_h$) نشان دهنده آن است که لایه اسکال محافظ درون سطح آجر وجود ندارد.



شکل ۱۱- گرافیک تعیین فرسایش آجر کوره و تشکیل اسکال فلزی مطابق با اختراع مرجع [۸]

۷- نمایش تغییرات دمای لایه تشکیل شده بر جداره با رنگ‌های مختلف

طی فرایندهای متالورژیکی در کوره، یک لایه رسوب بر سطح داخلی دیواره دیرگداز تشکیل می‌شود. این لایه می‌تواند مواد فلزی و یا قلیایی باشد و اگر تشکیل شود، در حین کار کوره رشد می‌کند. گاهی بخشی از این لایه از دیواره دیرگداز کنده شده و با مواد شارژ به فلز مذاب درون کوره وارد می‌شود که موجب افت دمای مذاب می‌شود. در اختراعی در سال ۲۰۰۲ [۹] به روشی برای تعیین لایه رسوب کرده بر سطح داخلی دیرگداز کوره متالورژیکی (تنها کوره دمش برای تولید آهن) اشاره شد. در این روش دمای دیرگداز چند نقطه مختلف بر حسب زمان اندازه‌گیری شده و سپس نرخ تغییرات دما در هر نقطه محاسبه می‌شود. در شکل ۱۲ کوره دمش آهن (۱) شامل یک پوسته فلزی استوانه‌ای (۱۲) پوشانده شده با آجر دیرگداز (۱۴) است. پروب‌های دمایی (۲۴) در مکان‌هایی در آجر دیرگداز قرار می‌گیرند (برای مثال در ردیف‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۹ و ۲۵) و سیگنال‌هایی را به کامپیوتر می‌دهند که نشان دهنده دمای دیرگداز در هر مکان پروب است. کامپیوتر نرخ تغییرات دما را بر حسب زمان محاسبه می‌کند. این محاسبات می‌تواند به صورت پیوسته و یا متناوب باشد برای مثال در هر ۱۵ دقیقه. نرخ تغییرات اطلاعات روی صفحه کامپیوتر نمایش داده می‌شود (شکل ۱۳) به طوری که هر مربع، یک مکان پروب است. برای مثال مربع‌های ردیف ۱، پروب‌های پیرامون آجر ۳ را نشان می‌دهند. نرخ محاسبه شده تغییرات دما در هر مربع با رنگی نشان داده می‌شود. رنگ هر مربع با حرف اول آن رنگ نشان داده می‌شود؛ مثلاً G یعنی سبز. در اینجا از رنگ بنفش برای نشان دادن نرخ تغییر (R) در دماهای بیشتر از آستانه اولیه $2/5 F/min$ استفاده شده است و یا اگر نرخ تغییر در محدوده میان $1/5-2/5$ باشد، از رنگ قرمز استفاده می‌شود. مربع‌های بنفش نشان می‌دهند که یک لایه نسبتاً ضخیم کنده شده است و اتلاف دمای زیادی در مذاب انتظار می‌رود. مربع‌های قرمز نشان می‌دهند که یک لایه نازک‌تر کنده شده است؛ مربع‌های زرد نشان می‌دهند کنده شدن روی داده است اما دمای مذاب کاهش نیافته است؛ مربع‌های سبز نشان می‌دهند که کنده شدن روی نداده است؛ مربع‌های آبی نشان می‌دهند که یک لایه بر پوشش دیرگداز در حال تشکیل شدن است. محدوده‌های انتخاب شده به نوع کوره بستگی دارد و تجربی است. عدد پایینی در هر مربع نیز دمای واقعی است. هنگامی که ۴ مربع یا بیشتر به رنگ بنفش یا قرمز باشند، یعنی بخش مهمی از لایه تشکیل شده کنده می‌شود.



شکل ۱۲- کوره دمش با مکان پروب‌های دمایی؛ تصویر مقطع ۲-۲ در سمت راست دیده می‌شود [۹]

FURNACE STACK TEMPERATURES ALARMS
DEGREES PER MINUTE THRESHOLD = 0.5

	1	2	3	4	5	6	7	8
ROW 25	0. G 551.	0. G 469.	0. G 375.	0. G 241.	0. G 314.	0. G 138.	0. G 285.	0. G 437.
ROW 19	0. G 731.	0. G 712.	0. G 666.	0. G 502.	0. G 498.	0. G 413.	0. G 581.	0. G 729.
ROW 15	0. G 820.	0. G 502.	0. G 833.	0. G 810.	0. G 691.	0. G 754.	0. G 634.	0. G 886.
ROW 12	0. G 643.	0. G 659.	0. G 565.	92. P 649.	239. P 774.	103. R 921.	146. R 768.	0. G 498.
ROW 9	0. G 419.	0. G 479.	0. G 534.	52. R 829.	160. R 856.	0. G 807.	0. G 497.	0. G 547.
ROW 6	0. G 476.	0. G 1202.	0. G 367.	0. G 822.	338. R 480.	0. G 663.	0. G 499.	0. G 539.
ROW 3	0. G 651.	0. G 924.	0. G 284.	0. G 655.	0. G 379.	0. G 515.	0. G 418.	0. G 746.

شکل ۱۳- نمای صفحه کامپیوتر نشان دهنده تغییرات دمای دیرگداز کوره در مقیاس تجاری و واقعی [۹]

۸- استفاده از ترموکوپل برای تعیین گرانی و دمای مذاب

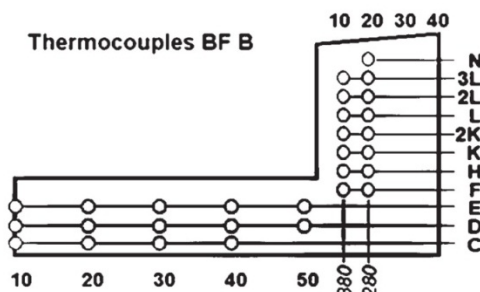
در سال ۲۰۰۳ گزارش شده که برای کنترل فرسایش دیرگداز می‌توان از یک سنسور (ترموکوپل) برای اندازه‌گیری دما و یک سنسور برای تعیین گرانی مذاب در کوره استفاده کرد [۱۰]. همچنین با استفاده از این اطلاعات، توسط دستگاه تنظیم کننده دمای مذاب، دمای مذاب در مقدار بهینه‌ای تنظیم می‌شود. این دما، کمترین دمایی است که در آن مذاب براحتی از کوره خارج می‌شود. در این روش مراحل زیر انجام می‌شود: ۱- اندازه‌گیری دمای دیرگداز، ۲- اندازه‌گیری گرانی مذاب در کوره، ۳- تنظیم دمای مذاب در دمای بهینه.

بنابراین در ابتدا مقدار فرسایش دیرگداز نسبت به یک مذاب مشخص پیش‌بینی می‌شود (نرخ تغییرات تئوری)؛ سپس نرخ تغییرات واقعی دمای دیرگداز با نرخ تغییرات تئوری مقایسه می‌شود. گرانی نیز با استفاده از یک ویسکوزیتر شیب‌دار اندازه‌گیری می‌شود. از آنالیز مذاب، تغییرات گرانی آن با دما محاسبه می‌شود. با داشتن ترکیب تئوری مذاب نقطه انجماد و دمای ایده‌آل آن تعیین می‌شود؛ این دمای بهینه، کمترین دمایی است که مذاب گرانی به حد کافی کم دارد. بنابراین در این اختراع با اندازه‌گیری دمای دیرگداز و سپس مقایسه با مقادیر بهینه تئوری برای داشتن کمترین نرخ فرسایش، فرسایش دیرگداز مانیتور می‌شود.

۹- استفاده از روش‌های ترکیبی (حرارتی و نرم‌افزاری)

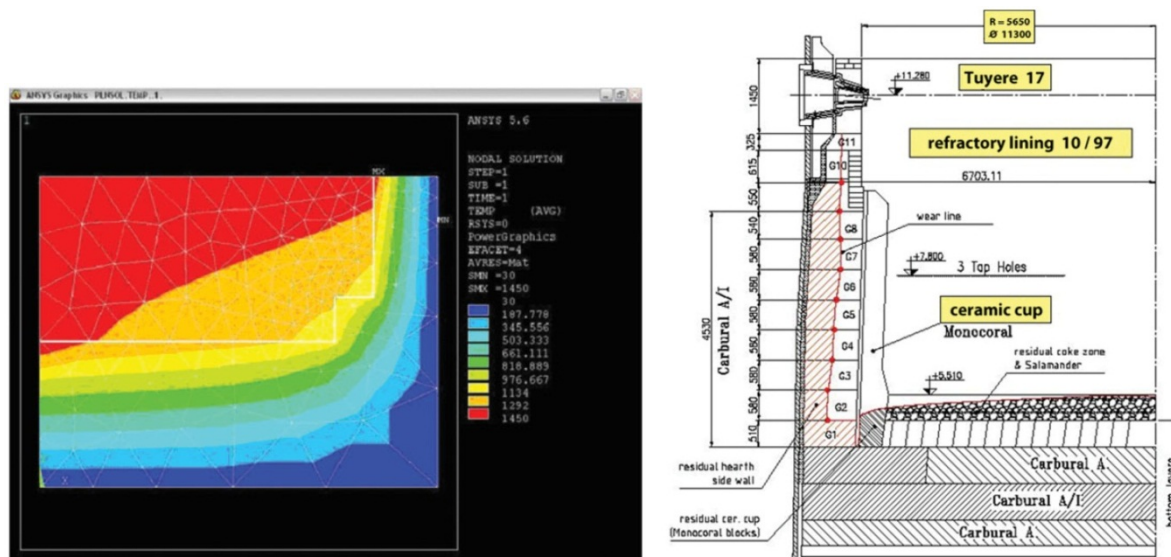
در سال‌های اخیر مانیتور کردن فرسایش دیرگداز در کوره با استفاده از ترکیب روش‌های حرارتی و نرم‌افزاری انجام شده است. در

مقاله‌ای [۱۱] در سال ۲۰۱۳ دستگاه مانیتور کننده آنالین برای آنالیز توزیع دما در کوره توسط ۲۰۰ ترموکوپل و یک مدل انتقال حرارت برای بیان وضعیت کوره استفاده شد. مدل انتقال حرارت شرایط حرارتی سرد شدن کف کوره و آجرها را آنالیز می‌کند. شکل ۱۴ سطح مقطع توزیع ترموکوپل‌ها را نشان می‌دهد. سه لایه افقی در کف و دولایه عمودی در دیواره قرار دارد تا اتلاف حرارت لحاظ شود. علاوه بر آن به اطلاعاتی در مورد قطر داخلی و خارجی کوره، ارتفاع مذاب، ضخامت لایه دیرگداز، زاویه چرخش، قطر دهانه ورودی، نرخ تولید، چگالی مذاب، دمای آب خنک کننده، ضریب انتقال حرارت و غیره نیاز می‌باشد.



شکل ۱۴- مکان قرارگیری ترموکوپل‌ها در هارت کوره [۱۱]

با استفاده از اطلاعات مذکور و اندازه‌گیری تغییرات دما، کامپیوتر می‌تواند پروفایل دمای قسمت‌های مختلف را در زمان‌های مختلف رسم کند. با استفاده از این اندازه‌گیری‌ها پروفایل پوشش دیرگداز کوره پس از طی مدت زمان طولانی قابل ترسیم می‌شود (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- پروفایل دما و فرسایش کوره [۱۱]

در مقاله دیگری [۱۲] به روشی برای محاسبه میدان‌های دمایی دوبعدی در هر سطح مقطع عمودی و افقی قلب کوره دم‌ش با استفاده از برنامه کامپیوتری رازگار گرنا^۱ اشاره شده است. در این روش روابط محاسباتی هدایت حرارتی بوسیله خواننده‌های سنسورهای دمایی بسیار (تا ۱۰۰۰ عدد) که در آستر کوره میان دیرگدازها نصب شده بود، حل شده است. از یک مدل ریاضی برای مانیتور کردن پیوسته دمایی آستر استفاده شد. پایگاه اطلاعاتی برنامه کامپیوتری رازگار گرنا بر اساس جمع‌آوری، تحلیل و انتقال اطلاعات از سنسور شار حرارت یا دما است. این برنامه در دو کوره دم‌ش در فولادسازی چین^۲ در جینان در حال اجرا است. با فرسایش دیرگداز، ضخامت لایه کم شده و ضخامت باقیمانده تعیین می‌شود.

تشخیص دیرگداز یک پاتیل متالورژیکی نیز بر اساس پردازش داده‌های آنالیندر سال ۲۰۱۳ [۱۳] انجام شده است که بر اساس

^۱ RazgarGorna computer program

^۲ Chinese steelworks at Jinan (two furnaces), Jiyuan, and Liuzhou

اندازه‌گیری میدان دمایی سطحی در حالت دینامیک است. در این روش از دمای فلز مذاب و دمای بیشینه سطح پاتیل در ضخامت‌های مختلف بر حسب زمان استفاده شد.

مراجع

- [1] Berry metal company, "Stave and Refractory Wear Monitoring System", <http://www.berrymetal.com/>.
- [2] SAVEWAY ® system, <http://www.saveway-germany.de/en/measuring-systems/saveway/>.
- [3] US3018663 Patent, "Furnace lining temperature-thickness measuring apparatus", 1962.
- [4] US3512413A Patent, "Measuring body capable of being built into the wall of a high-temperature furnace", 1970.
- [5] The on-line monitoring system in blast furnace (For further information, 1984 ISI write to Electronics Technology Center, Kobe Steel, Ltd., 53-3, Aza-maruyama, Gomo, Nada-ku, Kobe 657, New Technology).
- [6] US4358953 Patent, "Method of monitoring the wear of refractory walls of a blast furnace and temperature probe used for the method", 1982.
- [7] F. T. Gorobets, V. I. Samsonov, A. G. Ustinov, "A method of monitoring corrosion of the refractories in glass-melting furnaces", Translated from *Steklo i Keramika*, 7 (1983) 9-10, Plenum Publishing Corporation.
- [8] US5961214 patent, "Determining protective layer thickness of blast furnaces", 1999.
- [9] US6375346B1, "Method for detecting the spalling of a layer of buildup of a refractory lining in a metallurgical furnace", 2002.
- [10] WO03/076858A1 Patent, "Control of refractory wear", 2003.
- [11] R. M. Duarte¹, I. Ruiz-Bustinza, D. Carrascal, L. F. Verdeja, J. Mochoⁿ¹, A. Cores, "Monitoring and control of hearth refractory wear to improve blast furnace operation", *Ironmaking and Steelmaking*, 40 (2013) 350-359.
- [12] A. N. Dmitriev, Y. A. Chesnokov, K. Chen, O. Y. Ivanov, M. O. Zolotikh, "Monitoring the Wear of the Refractory Lining in the Blast Furnace Hearth", *Steel in Translation*, 43 (2013) 732-739.
- [13] V. Petkov, M. Hadjiski, K. Boshnakov, E. Mihailov, "Diagnosis of Metallurgical Ladle Refractory Lining Based on Non-Stationary On-Line Data Processing", *Cybernetics and information technologies*, 13 (2013) 122-130.



دکتر سید علی حسینی،
نویسنده مسئول مقاله، عضو
هیات علمی دانشگاه ارومیه

آلومینا، روش‌های تهیه و خواص سطحی آن

سید علی حسینی^{۱*}، مهران چیتان^۲

^۱ گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه ارومیه، آذربایجان غربی

^۲ گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی

چکیده: اکسید آلومینیوم یکی از ترکیبات غیرآلی با فرمول شیمیایی Al_2O_3 می‌باشد که نام‌های تجاری متنوعی مانند آلومینا^۱، کوراندوم^۲ و غیره دارد. این ماده دارای دمای ذوب بسیار بالایی در حدود ۲۰۵۴ درجه سانتیگراد و از لحاظ شیمیایی بسیار پایدار است. این ویژگی باعث می‌شود تا از این ماده در کاربردهایی استفاده شود که در آن نیاز به تحمل دمایی بالاست. از این ماده همچنین به عنوان پایه کاتالیست کاشت بیولوژیکی^۳ نیز استفاده می‌شود. سختی، استحکام و مقاومت به سایش آلومینا در بین اکسیدها، از همه بالاتر است و از این رو باعث می‌شود تا این ماده به عنوان ساینده، یاتاقان و ابزار برش مورد استفاده قرار گیرد. با افزودن کروم و تیتانیوم به این ماده، سنگ‌های قیمتی (مانند یاقوت کبود و یاقوت قرمز) و اجزای مورد استفاده در لیزرها ساخته می‌شود. آلومینا همچنین به صورت فازهای دیگر وجود دارد. این فازها عبارتند از: χ , γ , η , δ , θ , κ که هر کدام از این فازها دارای ویژگی و ساختار کریستالی خود است. البته این فازها، فازهای میانی و غیر پایدار هستند. حرارت دهی آلومینا، باعث تبدیل این فازها به فاز آلفا آلومینا می‌شود.

کلمات کلیدی: آلومینا، تبدیل فاز، پایداری حرارتی، گاما آلومینا، کاتالیست

۱- مقدمه

آلومینا برای سومری‌ها، مصریان، یونانی‌ها و رومیان شناخته شده بود و برای طیف وسیعی از کاربردها مثل قابض (برای بند آوردن خون)، دندانه برای رنگ پشم، برنزه کردن پوست، محصول ضد التهابی، بعنوان یک ماده شفابخش، ضد اسهال، ماده مورد استفاده برای مومیایی کردن و ماده ضد حریق مورد استفاده قرار می‌گرفت. مارگراف^۴ نخستین نوع آلومینا است که از خاک رس به وسیله اسیدسولفوریک در سال ۱۷۵۴ استخراج شده است و کلمه آلومینا اولین بار توسط گایتون^۵ در سال ۱۷۶۱ به کار برده شد.

آلومینا نخستین بار در نزدیکی های لس بوکس^۶ توسط بردیر^۷ کشف شد و نام آن را بوکسیت^۸ گذاشتند. ساخت تجاری آلومینا اولین بار در سال ۱۸۶۰ در جنوب فرانسه طی فرایند سنت-کلیر دوپل^۹ که شامل مورد حمله قرار گرفتن بوکسیت توسط سدیم کربنات^{۱۰} و رسوب دادن آلومینیم هیدروکسید است، صورت گرفت.

پیشرفت‌های مهم دیگر در تاریخ توسعه آلومینا، الکترولیز آن از آلومینیم در سال ۱۸۸۶ به وسیله هرولت^{۱۱} در فرانسه بود و پیشرفت دیگر استخراج آلومینا از بوکسیت توسط بایر^{۱۲} در سال ۱۸۸۸ بود [۱]. ساختار اصلی سلول واحد آلومینا دو وجه هگزاگونال^{۱۳} و اکتاهدرا^{۱۴} است که اتم‌ها را نگه

¹ Alumina

² Corundum

³ Biological Implant

⁴ Marggraf

⁵ Guyton

⁶ Les Baux

⁷ Berthier

⁸ Bauxite

⁹ Sainte-Claire Deville

¹⁰ Sodium carbonate

¹¹ Héroult

¹² Bayer

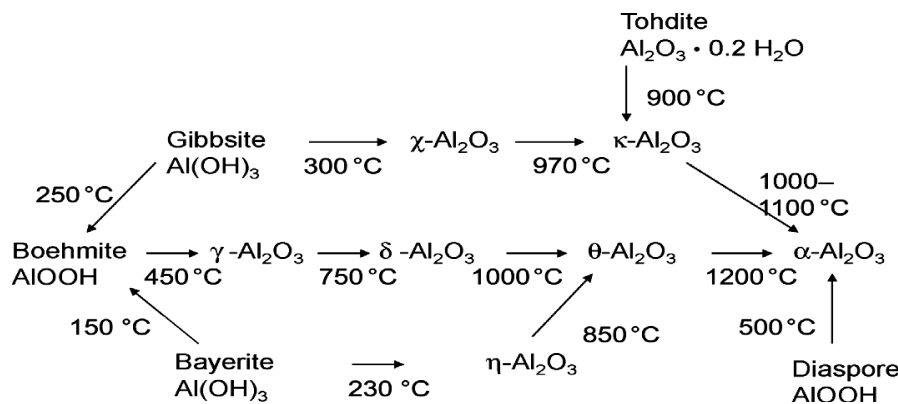
¹³ Hexagonal

¹⁴ Octahedral

داشته است. مراکز هگزاگونال اتم‌های گوشه ای در سلول هستند و در حالی که مراکز اکتاهدراالی در بین دو لایه از انباشته عمودی هستند. آلومینا به دلیل داشتن نقطه ذوب بالا، کانال‌های یکنواخت، مساحت سطح زیاد و توزیع اندازه منافذ یکنواخت دارای کاربردهای وسیعی در صنعت و پژوهش می‌باشد. همچنین به دلیل داشتن منافذ، مقاومت حرارتی بالا، دیسپرسه شدن خوب و قیمت مطلوب به عنوان کاتالیست و پایه کاتالیست در صنعت شیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آلومینا دارای فازهای ترمودینامیکی از قبیل: γ ، δ ، θ است که در نهایت با افزایش دما تمام فازها به پایدارترین حالت ترمودینامیکی یعنی α ختم می‌شوند. مهم‌ترین ساختار آلومینا که بیشتر به عنوان کاتالیست در صنایع نفت، اتومبیل و ساختارهای کامپوزیتی برای هوا و فضا، پوشش‌های عایق و پایداری حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد گاما آلومینا است. گاما آلومینا به دلیل دارا بودن مساحت سطح زیاد و مراکز اسیدیتته لوئیس در سطح آن بیشترین کاربرد را در صنعت کاتالیست دارد.

آلومینای فعال شده به طور وسیعی در ساخت مواد جاذب و کاتالیزورهای دارای سطح بزرگ، ساختمان متخلخل و فعالیت شیمیایی سطحی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. آلومینای فعال شده از آب زدایی آلومیناهای هیدراته مختلف از طریق کنترل حرارت به دست می‌آیند. طرح مناسب‌ترین مسیر تحولات فازی بین پلی‌مورف‌های مختلف آلومینا در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- اکثر مسیرهای تکامل مشترک برای تحولات فاز هیدروکسیدها و اکسیدهای آلومینیوم بر اساس عملیات حرارتی.

همانطور که معلوم هست تحولات گرمایی آلومینا به آلفا آلومینا ختم می‌شود که از نظر ترمودینامیکی پایدار می‌باشد.

۲- ساختار کریستالی و ریخت شناسی گاما آلومینا (γ - Al_2O_3)

گاما آلومینا از ماده اولیه آمورف یا کریستالی در دمای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل می‌شود [۲]. هنگامی که گاما آلومینا از مواد اولیه آمورف تهیه می‌شود ساختار آن به شکل مکعبی است [۲] ولی اگر از مواد اولیه بوهمیت و گیبسیت ساخته شود ساختار آن بین مکعبی و تترا گونال تغییر یافته می‌باشد [۳]. به‌تازگی، ساختار تتراگونال گاما آلومینا به‌دست آمده از بوهمیت بین ۴۵۰-۷۵۰ درجه سانتیگراد گزارش شده است [۴]. با افزایش دما انحراف از حالت تتراگونالی کاهش می‌یابد تا جایی که دیگر ساختار مکعبی وجود نخواهد داشت. فاز جدیدی در دمای بالاتر از ۷۵۰ درجه سانتیگراد با نظم کاتیونی آشکار شناسایی شده است [۵].

تفاوت اصلی در نظر گرفته شده بین فازها، در آرایش اتم آلومینیم می‌باشد که در گاما آلومینا در سایت‌های خالی اکتاهدراال و تتراهدراال توزیع شده‌اند. برخی مطالعات نشان می‌دهند که مقدار قابل توجهی اتم هیدروژن در ساختار گاما آلومینا وجود دارد که در ساختار اسپینلی به عنوان گروه هیدروکسی شناسایی شده‌اند [۶]. افزایش دما در آلومینا باعث از بین رفتن گروه هیدروکسی موجود در آن می‌شود که این خود باعث ایجاد کاتیون‌های آلومینیوم چهار بار مثبت (Al^{4+}) در تتراهدراال و شش بار مثبت (Al^{6+}) در اکتاهدراال می‌شود [۷]. تفسیر نتایج حاصله از سطح و ویژگی‌های کاتالیزوری گاما آلومینا، نه تنها فقط ساختار آن بلکه تجزیه و تحلیل اطلاعات دقیق مورفولوژی ذرات نیز مورد نیاز است.

همانطور که گفته شد روش‌های مختلفی برای تولید تجاری گاما آلومینا وجود دارد. برخی از روش‌ها از تهیه بوهمیت شروع می‌شوند، تمامی بوهمیت بعد از تجزیه به گاما آلومینا تبدیل می‌شود. مورفولوژی حاصل از گاما آلومینا به شدت به ماده اولیه

بوهمیت بستگی دارد[۸].

ژیونگ^۱ و همکاران هنگامی تجزیه و تحلیل بر روی لایه‌های آندی آلومینیم، پیک‌هایی از سیگما آلومینا در نواحی ۷۴۰ و ۸۳۰ مشاهده کردند [۹]. با ترکیب نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپی الکترونی، پراش اشعه X و محاسبات تئوری تابع چگالی اخیرا به این نتیجه رسیده‌اند که ساختار سیگما آلومینا از دو شکل بلور شناسی تا حدودی مختلف ساخته شده است. چندین تحقیق بر روی سطح سیگما آلومینا انجام گرفته است. آلومینای مشهور به آروکسید-سی از شرکت اونیک از نظر بسیاری از محققین سیگما آلومینا است. تصویر TEM با وضوح بالا این ماده نشان داد که ذرات آن به صورت هگزاگونالی بوده و به صورت منظم کنار هم قرار گرفته‌اند درحالی که در تجزیه و تحلیل بیشتر مربوط به آن پیشنهاد شد که بصورت مکعبی باشد. سطح این ماده در بسیاری از بررسی‌ها مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه روش ساخت این مواد کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، اما این ماده از روش غیر متداول تهیه می‌شود و سیگما آلومینای نرمال دارای ناخالصی‌های متفاوتی از نمونه‌ای که از بوهمیت ساخته شده است می‌باشد. علاوه بر این نمونه‌ای از این ماده اغلب حاوی مخلوطی از فازها می‌باشد. بنابراین این ماده نماینده خوبی از سیگما آلومینا نمی‌باشد[۱۰]. اسیدپتته سطح مخلوطی از فازهای سیگما و تتا آلومینا بر اساس جذب مولکول کاوشگر مورد بررسی قرار گرفت. در واقع پودر سیگما آلومینا رفتاری شبیه به دیگر گذار آلومینا را از خود نشان می‌دهد. برای مثال در رفتار اسیدی کاتالیست شبیه به گاما و اتا آلومینا است[۱۱].

با توجه به تحقیقات سانگ^۲ و همکارانش، سیگما آلومینا فعالیت کمتری به عنوان کاتالیست در واکنش هیدروژن‌زدایی از متانول نسبت به سه فاز گاما، اتا و تتا آلومینا دارد و همچنین اسید لوئیس ضعیف‌تری نسبت به این سه فاز است ولی اسیدپتته بیشتری و فعالیت بیشتری نسبت به دو فاز آلفا و کاپا آلومینا را دارا می‌باشد[۱۲].

۳- ساختار کریستالی و مورفولوژی آلفا آلومینا ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)

همه پلی‌مورف‌های آلومینا در اثر کلسیناسیون به آلفا آلومینا (کورانوم) در دمای ۸۰۰ الی ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد تبدیل می‌شوند. یون‌های آلومینیم در کورانوم دارای شش پیوند هستند، و همه یون‌های اکسید در کئوردیناسیون چهار برابر شده‌اند. آخرین مرحله در تحول حرارتی اکسید و هیدروکسیدهای آلومینیوم معمولا انتقال فاز از تتا آلومینا به آلفا آلومینا است، که به‌طور ناگهانی در محدوده درجه حرارت بین ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ رخ می‌دهد که به‌عنوان یک سیگنال DTA گرمازا به‌خوبی نشان داد[۱۳]. این انتقال با کاهش تخلخل و مساحت سطح و همچنین افزایش اندازه همراه است. پودر آلفا آلومینای تولید شده در دمای بالا، توسط BET مشخص شد که دارای مساحت سطح کمتر از ۵ متر مربع بر گرم و حجم منافذ کمتر از ۰/۵ سانتیمتر مکعب بر گرم است. به وسیله کنترل دما و زمان ممکن است مساحت سطح بالا مشاهده شود، اما زیر ۵۰ متر مربع بر گرم باقی می‌ماند. اگر ذرات در اندازه نانو باشند انتقال تتا آلومینا به آلفا آلومینا بدون رشد کریستال در دمای پایین حدود ۸۰۰ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد. این اتفاق در اندازه کریستالی حدود ۲۰ الی ۲۵ نانو متر رخ می‌دهد، بالاتر از این اندازه رشد کریستال خواهیم داشت[۱۴]. پودر آلفا آلومینا می‌تواند به وسیله کلسیناسیون هیدروکسید آلومینیوم و یا هر آمورف دیگری با ارائه دمای زیاد تشکیل شود. رفتار رسوب در طول کلسیناسیون بستگی به نمک پیش ماده و حضور مواد افزودنی، که می‌تواند درجه حرارت برای تشکیل آلفا آلومینا را کاهش دهند بستگی دارد[۱۵]. مسیر متداول تولید آلفا آلومینا، کلسیناسیون و تجزیه گیسیت در دمای ۵۰۰ الی ۶۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد، با این روش مساحت سطح نزدیک به ۶۵ متر مربع بر گرم ممکن است مشاهده شود. آلفا آلومینا می‌تواند تحت شرایط هیدروترمال تهیه شود که با این روش می‌توان ذرات نانو با مساحت سطح قابل توجه و بالای ۱۶۰ متر مربع بر گرم تولید کرد.

مشخص شده است که آلفا آلومینای سنتز شده در محلول یک و چهار بوتادی‌ال بر روی متغیرهای مختلف از جمله زمان واکنش، سرعت هم زدن، و مقدار ترکیبات آلی و بر روی شکل و اندازه ذرات تاثیر می‌گذارد. با تغییر شرایط می‌توان کریستال‌های متفاوتی از آلفا آلومینا، از جمله پلاکت دایره، هگزاگونال، هگزاگونال اصلاح شده در لبه، دوازده وجهی، چند وجهی چهارده رویه،

¹Xiong
²Sung

چندوجهی بیست رویه، منشور هگزاگونال و منشور هگزاگونال اصیاح شده در لبه را تهیه کرد [۳۰]. کریستال آلفا آلومینای هگزاگونالی از پیش ماده گیپسیت در pH برابر ۹ در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد سنتز می‌شود، این محصول با سطح ویژه ۲۶ متر مربع بر گرم مشخص شده است [۱۶].

پودر کوراندوم به وسیله سختی بالا، دمای ذوب بالا (۲۰۵۳ درجه سانتیگراد) و مقاومت الکتریکی بالابه مواد سرامیکی مرتبط هستند. در تحقیقات طیفی مادون قرمز، یک گروه در ۳۷۱۰، مشخص شده است که به گروه‌های هیدروکسید جدا شده بر روی سطح آلفا آلومینا اختصاص داده شده است [۱۶].

طیف حاصل از گروه‌های هیدروکسیل سطحی پودر آلفا آلومینا به‌طور قابل توجهی در نمونه‌های مختلف متفاوت است. جذب مولکول‌های اساسی کاوشگر مانند پیریدین‌های آمونواکسید کربن به‌طور معمول نشان می‌دهد که سایت‌های اسیدلویس از قدرت متوسطی برخوردارند، در حالی که مراکز به شدت اسیدی که در انتقال آلومیناها مشاهده شده است در اینجا وجود ندارد [۱۷]. با این حال مراکز موجود به شرایط کلسیناسیون و شرایط از دست دادن آب به کاربرد قبل از جذب و سطح ویژه نمونه اثر دارد بستگی دارد. بعضی از خواص سطحی با انتقال فازهای آلومینا حفظ خواهد شد. فعالیت کاتالیزوری آلفا آلومینا برای واکنش‌های کاتالیستی اسیدی معمولاً پایین است [۱۷].

۴- روش‌های تهیه آلومینا

رسوب هیدروترمال در دمای نسبتاً بالا و تحت فشار باعث سنتز مستقیم پودر آلفا آلومینا می‌باشد که با استفاده از تنظیم شرایط می‌توان نانو ذرات کوراندوم را به دست آورد [۱۸]. آلومینا می‌تواند از تجزیه حرارتی نمک آلومینیم هم تهیه شود. آلومینیم نترات دکا هیدرات در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد به آمورف‌های آلومینا تبدیل می‌شود [۱۹].

تجزیه حرارتی بلوری هیدروکسید کربنات آلومینیم آمونیم $(\text{NH}_4[\text{Al}(\text{OOH})\text{HCO}_3])$ در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد باعث تولید گاما آلومینا با سطح ویژه بالا می‌شود [۱۹]. همچنین تجزیه کریستال آلومینیم هیدروکسی استات $\text{Al}(\text{OH})(\text{CH}_3\text{COO})_2$ در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد باعث تولید گاما آلومینا می‌شود [۲۰].

تجزیه آلومینیم هیدروکسید کلرید شش آبه $\text{AlCl}_3 \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ در دماهای پایین در ابتدا محصول آمورف را می‌دهد، و پس از آن آلومیناهای واسطه تشکیل می‌شوند. با این حال اگر گاز به سرعت حذف شود، محصول آمورف تجزیه و مستقیم به فاز آلفا آلومینا در دمای ۵۳۰ درجه سانتیگراد تبدیل می‌شود [۲۱].

تجزیه $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ در چهار مرحله منجر به تبدیل به آلومینا می‌شود، در دمای زیر ۳۵۰ درجه سانتیگراد، ترکیب به تدریج آب از دست می‌دهد، در نزدیک ۸۵۰ درجه سانتیگراد سولفات آلومینیم باقی مانده شروع به تجزیه شدن می‌کند [۲۲]. کلسیناسیون آمونیم آلومینیم سولفات در ۸۰۰ درجه سانتیگراد منجر به تبدیل به آلومینیم سولفات می‌شود، درحالی که در دماهای بالاتر (۹۰۰-۱۰۰۰)، گاما آلومینا تولید می‌شود، و در دماهای بالاتر به کوراندوم انتقال می‌یابد [۲۳].

سنتز احتراقی، یک روش مناسب برای ایجاد مواد اکسید پیچیده است، که همچنین برای تهیه آلومینا نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴]. با استفاده از فرایند گلیسین-نترات، مواد آمورف تولید می‌شوند که با استفاده از حرارت بیشتر به گاما آلومینا تبدیل می‌شود [۲۵]. ترکیبی از تارتاریک اسید و نترات آلومینیم تحت شرایط هیدروترمال باعث تولید آمورف آلومینا می‌شوند که ترکیبی شبیه بوهمیت بدست می‌آید. گاما آلومینا با سطح ویژه متوسط را می‌توان از ماده اولیه آلکوکسید آلومینیم توسط سنتز احتراقی تهیه کرد [۲۵].

۵- ساختارهای سطحی و شیمی آلومینا

چندین تحقیق در مورد حالت‌های مختلف آلومینا برای شناسایی گروه‌های هیدروکسیل انجام گرفته است. اندازه‌گیری‌های طیفی مانند طیف مادون قرمز یا NMR^۱ حضور گروه‌های هیدروکسی را بر روی سطح آلومینا حتی بعد از خارج سازی گاز در دمای بالا نشان می‌دهند. طیف HNMR گاما آلومینا طیف پیچیده‌ای است که به عنوان هیدروکسیل زدایی پیش می‌رود. با این حال چنین

¹ Nuclear magnetic resonance

طیفی بعد از خارج سازی گاز^۱ از نمونه ضبط شده، پیک‌های آزاد و پیوند هیدروژن گروه‌های هیدروکسیل و جذبی آب را نشان می‌دهد [۲۶]. دی‌کانیو^۲ و همکاران تغییرات شیمیایی هیدروژن را در ppm (-۰.۳) _ ۰.۳ _ ۱.۵ _ ۲.۴ _ ۴.۰ _ ۵.۰ _ ۶.۵ _ ۷.۱ و ۷.۸ برای نمونه گاما آلومینا^۳ مشاهده کرده‌اند که بدون ناخالصی بوده است [۲۷].

دنگ^۴ و همکاران هم پیک در 0 ppm که مربوط به گروه‌های هیدروکسی انتهایی متصل به یون‌های آلومینیم اکتاهدرال می‌باشد و یک پیک در ۲ ppm که مربوط به پل‌های گروه‌های هیدروکسی متصل به یون‌های آلومینیم اکتاهدرالی و تتراهدرالی است، و پیک کوچکی در ۴.۳ ppm مربوط به پل‌های سه تایی هیدروکسی است را به دست آورده‌اند [۲۸]. طیف مادون قرمز آمورف‌های آلومینا^۵، گروه‌های هیدروکسی را با پیک‌هایی در حدود ۳۷۸۰ الی ۳۷۹۵، ۳۷۳۰ الی ۳۷۵۰ و ۳۶۸۰ نشان می‌دهند. اکثر تحقیقات طیفی مادون قرمز به گروه‌های هیدروکسیل سطح گاما آلومینا اختصاص داده شده‌اند. حداقل پنج باند در ناحیه ارتعاش کششی هیدروکسی مادون قرمز از گاما آلومینا وجود دارد. این باندها معمولاً در ۳۷۹۰، ۳۷۷۰، ۳۷۲۰ الی ۳۷۴۰، ۳۶۶۰ الی ۳۷۰۰ و ۳۵۸۰ قرار دارند.

هیدروکسیل زدایی تنها در بخشی از گاما آلومینا امکان‌پذیر است، با این حال دما باید در محدوده‌ای باقی بماند که فاز در آن پایدار است و نباید از ۷۵۰ تجاوز کند. همانطور که دما گاز زدایی افزایش می‌یابد، باند جذبی ۳۷۰۰ تا زمانی که ناپدید می‌شود به تدریج افزایش می‌یابد [۲۹].

پیک‌های ۳۷۳۰ و ۳۷۹۰ در طیف مادون قرمز همیشه مربوط به فازهای آلومینا هستند. شدت باند در ۳۷۹۰ قطعاً از شدت باند در ۳۷۳۰ کمتر است، که قوی‌ترین باند بعد از جداسازی گاز در دمای بالا است. با این حال موقعیت این باند همیشه یکسان نیست. برای بعضی در ۳۷۲۴ و برای بعضی دیگر در ۳۷۳۷ مشاهده می‌شود [۳۰].

بر اساس نتایج آزمایش، محققین به این نتیجه رسیدند که سطح گاما آلومینا تراکم بالاتری از گروه‌های هیدروکسی نسبت به سطح سیگما آلومینا دارد و گروه‌های موجود به طور یکنواخت بر روی سطح پخش نشده‌اند. کسری از گروه‌های هیدروکسیل که نواحی از تراکم هیدروکسیل بالاتر را نشان می‌دهد به نظر می‌رسد که به نوع آلومینا بستگی دارد. در واقع مشخص شد که گروه‌های هیدروکسیل خوشه‌ای بیشتر بر روی سیگما آلومینا قرار دارند تا گاما آلومینا، که می‌توان به وسیله ناپدید شدن مناطق با تراکم کم هیدروکسیل در طی فرایند تبدیل گاما آلومینا به سیگما آلومینا آن را توضیح داد [۳۱].

گروه‌های هیدروکسید انتهایی روی مراکز آلومینیم شش بار مثبت (Al^{6+}) دارای بار ۰.۵- است و پیک آن با بالاترین فرکانس واقع در ۳۷۸۵ الی ۳۸۰۰ پیشنهاد شده است. گروه‌های هیدروکسید انتهایی بر روی مراکز آلومینیم چهار بار مثبت (Al^{4+}) دارای بار ۰.۲۵- است و پیک آن در ۳۷۶۰ الی ۳۷۸۰ پیشنهاد شده است. گروه‌های پل هیدروکسید بین دو یون آلومینیم چهار بار مثبت (Al^{4+}) بدون بار است و در ناحیه ۳۷۴۰ الی ۳۷۴۵ ایجاد می‌شود، همچنین گروه‌های هیدروکسید بین آلومینیم چهار بار مثبت (Al^{4+}) و آلومینیم شش بار مثبت (Al^{6+}) دارای بار ۰.۲۵+ است و پیک آن در ۳۷۳۰ الی ۳۷۳۵ ظاهر می‌شود و گروه‌های هیدروکسی سه‌پله دارای بار ۰.۵+ است و پیک آن در ۳۷۰۰ الی ۳۷۱۰ دیده می‌شود. پیک فرکانس‌های پایین‌تر به پیوند هیدروژنی مربوط است. با توجه به این مدل گروه‌های هیدروکسید انتهایی که به وسیله بار منفی مشخص شده‌اند باید دارای خواص بازی باشند، در حالی که گروه‌های هیدروکسید سه‌پله با بار مثبت باید خاصیت اسیدی داشته باشند [۳۲]. همچنین ساختارهای نوع اسپینل^۶ فراوان‌ترین ساختار در نظر گرفته شده و تغییرات توضیح داده شده در بالا نوع گروه‌های هیدروکسید بدون تغییر ساختار را نشان داده است [۳۲]. تحقیقات چن^۷ و ژانگ^۸ و کار محاسباتی آلوآرز^۹ و همکاران هر دو نشان دادند که تعدادی از گروه‌های هیدروکسید سطح مختلف ممکن است بالاتر گزارش شوند. در واقع طیف مادون قرمز تجربی پیچیده‌تر از مدل خود را پیش بینی می‌کند [۳۳، ۳۴].

¹ Outgassing

² De Canio

³ γ -Alumina

⁴ Deng

⁵ Amorphous Aluminas

⁶ spinel

⁷ Chen

⁸ Zhang

⁹ Alvarez

فعالیت کاتالیستی آلومیناهای «گذار» مخصوصاً δ ، η ، γ ، و θ - Al_2O_3 در بسیاری از موارد (برای مثال در واکنش‌ها) مسلماً وابسته به اسیدیته لوئیس^۱ تعداد کمی از یون‌های آلومینیوم سطحی می‌باشد که به مقدار کمی بر روی سطح کوردینه شده‌اند. اسیدیته لوئیس با ماهیت یونی پیوند Al-O رابطه دارد. تنوع‌های بین فعالیت کاتالیستی مربوط به پلی‌مورف‌ها برای واکنش‌های کاتالیز شده با اسید اساساً ناشی از تنوع در مساحت سطح و مورفولوژی می‌باشد چون کیفیت سایت‌های اسیدی خیلی مطابق با آزمایشات طیفی می‌باشد [۳۵]. به عنوان مثال، گاما آلومینا معمولاً اندکی فعالیت کمتری از اتا آلومینا دارد اما هر دو این ترکیبات فعال‌تر از سیگما آلومینا یا تتا آلومینا می‌باشند که معمولاً مساحت سطح کمتری دارند. سایت‌های اسیدلوئیس به‌طور وسیع به‌وسیله جذب مولکول‌های کاوشگر^۲ در ترکیب با آنالیزهای طیفی یا کالری متریک تعیین ویژگی شده‌اند [۳۵].

بررسی اسیدیته لوئیس سطحی آلومینا اساساً به‌وسیله جذب کاوشگرهای اصلی بعد از هیدروکسیل‌زدایی نمونه به‌وسیله خارج‌سازی گازی قابل اجرا می‌باشد. براساس نتایج اسپکتروسکوپی، بسیاری از نویسندگان موافق هستند که حداقل سه نوع مختلف سایت‌های اسیدلوئیس (با قدرت‌های اسیدی ضعیف، متوسط و قوی) بر روی آلومیناهای گذار وجود دارند [۳۶]. مولکول کاوشگر که به‌صورت رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد کربن‌مونواکسید می‌باشد که در دمای پایین جذب شده است. کربن‌مونواکسید جذب شده بر روی سایت‌های اسیدلوئیس گاما آلومینا هیدروکسیل‌زدایی شده در یک دمای ملایم، به‌وسیله یک پیوندی که به‌صورت پیوسته با کاهش پوشش از حدود ۲۱۸۵ به کمی بالاتر از ۲۲۰۰ جابجا می‌شود تعیین ویژگی شده است. علاوه بر این دو جزء ضعیف در حدود ۲۲۲۰ و ۲۲۳۰ وجود دارند که این دو جزء بیشتر آشکارتر می‌شود اگر خارج‌سازی گاز قبلی در دمای بالاتری انجام شود [۳۷، ۳۸].

براساس کارگریو^۳ و همکارانش پیوند در ۲۱۷۰-۲۲۰۵ می‌تواند به کربن‌مونواکسید جذب شده بر روی سایت‌های لوئیس قرار گرفته بر روی سطوح صاف نسبت داده شود در حالی که پیوندها در حدود ۲۲۳۰ و ۲۲۱۵ ممکن است نشان دهنده برهمکنش کربن‌مونواکسید با یون‌های Al^{3+} قرار گرفته به‌ترتیب بر روی گوشه‌ها و لبه‌ها یا دندان‌ها باشد. سایت‌های اسیدی خیلی قوی‌تر می‌توانند هیدروژن مولکولی را به خاطر دارا بودن گونه‌های قابل تمییز از نظر اسپکتروسکوپی در ۲۰ درجه کلون جذب کنند [۳۹]. با استفاده از نیتروژن به عنوان کاوشگر، ویسچرت و همکارانش حضور چهار سایت اسیدی بر روی نمونه آلومینای بخار شده را نشان دادند و سایتی با بیشترین قدرت اسیدی شامل Al^{3+} سه کوردینه را پیشنهاد کردند [۴۰].

براساس اطلاعات ما، یک بررسی با جزئیات ویژگی‌های سطحی χ - Al_2O_3 تا به حال گزارش نشده است اما نشانه‌هایی وجود دارند که بیان می‌کنند باید یک سطح اسیدی مشابه با سطح گاما آلومینا وجود داشته باشد. درحالی‌که برای $K-Al_2O_3$ حضور مناسب سایت‌های قوی اسیدلوئیس مشابه با سایت‌های با قدرت متوسط بر روی گاما آلومینا با استفاده از اصول اسپکتروسکوپی مادون قرمز پیریدین جذب شده گزارش شده است. اگرچه غلظت سطحی این سایت‌ها گزارش شده است که کم باشد که این ممکن است به نسبت کم یون‌های Al^{3+} تراهدرال‌ها کتاهدرال در مواد توده‌ای نسبت داده شود.

مراجع

- [1] Davis, K., 2010, Material Review: Alumina (Al_2O_3), School of Doctoral Studies European Union Journal, Vol.1:109-114.
- [2] Levin, I., Bendersky, L., Brandon, D., Rühle, M., 1997, Cubic to monoclinic phase transformations in alumina, Acta materialia, Vol. 45: 3659-3669.
- [3] Wang, Y.G., et al., 1998, Ordering of octahedral vacancies in transition aluminas, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 81: 1655-1660.
- [4] Paglia, G., et al., 2004, Boehmite derived γ -alumina system. 1. Structural evolution with temperature, with the identification and structural determination of a new transition phase, γ' -alumina, Chemistry of materials, Vol. 16: 220-236.
- [5] French, R. H., Müllejans, H., Jones, D. J., 1998, Optical Properties of Aluminum Oxide: Determined from Vacuum Ultraviolet and Electron Energy Loss Spectroscopies, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 81: 2549-2557.
- [6] Sohlberg, K., Pennycook, S.J., Pantelides, S.T., 1999, Hydrogen and the structure of the transition aluminas, Journal of the American Chemical Society, Vol. 121: 7493-7499.

¹ Lewis Acidity

² Probe Molecules

³ Gribov

- [7] Sohlberg, K., Pennycook, S.J., Pantelides, S.T., 1999, Explanation of the observed dearth of three-coordinated Al on γ -alumina surfaces, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 121: 10999-11001.
- [8] Krokidis, X.; Raybaud, P.; Gobichon, A.-E.; Rebours, B.; Euzen, P.; Toulhoat, H., 2001, Theoretical study of the dehydration process of boehmite to γ -alumina, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 105: 5121-5130.
- [9] Xiong, G.; Elam, J. W.; Feng, H.; Han, C. Y.; Wang, H.-H.; Iton, L. E.; Curtiss, L. A.; Pellin, M. J.; Kung, M.; Kung, H., 2005, Effect of atomic layer deposition coatings on the surface structure of anodic aluminum oxide membranes, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 109: 14059-14063.
- [10] MacKenzie, K.J., Temuujin, J., Okada, K., 1999, Thermal decomposition of mechanically activated gibbsite, *Thermochimica acta*, Vol. 327: 103-108.
- [11] Carre, S., Gnep, N.S., Revel, R., Magnoux, P., 2008, Characterization of the acid-base properties of transition aluminas by model reaction, *Applied Catalysis A: General*, Vol. 348: 71-78.
- [12] Sung, D. M.; Kim, Y. H.; Park, E. D.; Yie, J. E., 2010, Correlation between acidity and catalytic activity for the methanol dehydration over various aluminum oxides. *Research on Chemical Intermediates*, Vol. 36: 653-660.
- [13] Bolis, V., Cerrato, G., Magnacca, G., Morterra, C., 1998, Surface acidity of metal oxides. Combined microcalorimetric and IR-spectroscopic studies of variously dehydrated systems, *Thermochimica acta*, Vol. 312: 63-77.
- [14] Kim, H.N., Lee, S.K., 2013, Effect of particle size on phase transitions in metastable alumina nanoparticles: A view from high-resolution solid-state ^{27}Al NMR study, *American Mineralogist*, Vol. 98: 1198-1210.
- [15] Wen, H.-L., Chen, Y.-Y., Yen, F.-S., Huang, C.-Y., 1999, Size characterization of θ - and α - Al_2O_3 crystallites during phase transformation, *Nanostructured materials*, Vol. 11: 89-101.
- [16] Kim, H. J.; Kim, T. G.; Kim, J. J.; Park, S. S.; Hong, S. S.; Lee, G. D., 2008, Influences of precursor and additive on the morphology of nanocrystalline α -alumina, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 69: 1521-1524.
- [17] Ma, G., Liu, D., Allen, H.C., 2004, Piperidine adsorption on hydrated α -alumina (0001) surface studied by vibrational sum frequency generation spectroscopy, *Langmuir*, Vol. 20: 11620-11629.
- [18] Al'myasheva, O. V., Korytkova, E. N., Maslov, A. V., & Gusarov, V. V. (2005). Preparation of nanocrystalline alumina under hydrothermal conditions. *Inorganic materials*, 41(5), 460-467.
- [19] Pacewska, B., Keshr, M., 2002, Thermal transformations of aluminium nitrate hydrate, *Thermochimica acta*, Vol. 385: 73-80.
- [20] Hu, X.; Liu, Y.; Tang, Z.; Li, G.; Zhao, R.; Liu, C , 2012, Fabrication of high-surface-area γ -alumina by thermal decomposition of AACH precursor using low-temperature solid-state reaction, *Materials Research Bulletin*, Vol. 47: 4271-4277.
- [21] Brand, P., Troschke, R., Weigelt, H., 1989, Formation of α Al_2O_3 by thermal decomposition of basic aluminium chlorides at low temperatures, *Crystal Research and Technology*, Vol. 24: 671-675.
- [22] Çilgi, G.K., Cetişli, H., 2009, Thermal decomposition kinetics of aluminum sulfate hydrate, *Journal of thermal analysis and calorimetry*, Vol. 98: 855-861.
- [23] Park, H., Park, Y., Stevens, R., 2004, Synthesis of alumina from high purity alum derived from coal fly ash, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 367: 166-170.
- [24] Liu, G., Li, J., Chen, K., 2013, Combustion synthesis of refractory and hard materials: a review, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 39: 90-102.
- [25] Toniolo, J., Lima, M., Takimi, A., Bergmann, C., 2005, Synthesis of alumina powders by the glycine-nitrate combustion process, *Materials Research Bulletin*, Vol. 40: 561-571.
- [26] Mastikhin, V., Mudrakovsky, I., Nosov, A., 1991, ^1H NMR magic angle spinning (MAS) studies of heterogeneous catalysis, *Progress in nuclear magnetic resonance spectroscopy*, Vol. 23: 259-299.
- [27] DeCanio, E., Edwards, J., Bruno, J., 1994, Solid-State ^1H MAS NMR characterization of γ -alumina and modified γ -aluminas, *Journal of Catalysis*, Vol. 148: 76-83.
- [28] Deng, F.; Wang, G.; Du, Y.; Ye, C.; Kong, Y.; Li, X., 1997, ^1H MAS and ^1H [^{23}Na] double resonance NMR studies on the modification of surface hydroxyl groups of γ -alumina by sodium, *Solid state nuclear magnetic resonance*, Vol. 7: 281-290.
- [29] Ballinger, T.H., Yates Jr, J.T., 1991, IR spectroscopic detection of Lewis acid sites on alumina using adsorbed carbon monoxide. Correlation with aluminum-hydroxyl group removal, *Langmuir*, Vol. 7: 3041-3045.
- [30] Srinivasan, S., Narayanan, C., Datye, A., 1995, The role of sodium and structure on the catalytic behavior of alumina: II. IR spectroscopy, *Applied Catalysis A: General*, Vol. 132: 289-308.
- [31] Métivier, R.; Leray, I.; Lefèvre, J.-P.; Roy-Auberger, M.; Zanier-Szydłowski, N.; Valeur, B., 2003, Characterization of alumina surfaces by fluorescence spectroscopy Part 2. Photophysics of a bound pyrene derivative as a probe of the spatial distribution of reactive hydroxyl groups. *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 5: 758-766.
- [32] Knözinger, H.; Ratnasamy, P., 1978, Catalytic aluminas: surface models and characterization of surface sites. *Catalysis Reviews Science and Engineering*, Vol. 17: 31-70.
- [33] Chen, Y.; Zhang, L., 1992, Surface interaction model of γ -alumina-supported metal oxides. *Catalysis letters*, Vol. 12: 51-62.
- [34] Alvarez, L. J.; Sanz, J. F.; Capitán, M. J.; Centeno, M. A.; Odriozola, J. A., 1993, Surface models for γ - Al_2O_3 from molecular dynamics simulations. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, Vol. 89: 3623-3628.

- [35] Busca, G., 1999, The surface acidity of solid oxides and its characterization by IR spectroscopic methods. An attempt at systematization. *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 1: 723-736.
- [36] Morterra, C.; Magnacca, G., 1996, A case study: surface chemistry and surface structure of catalytic aluminas, as studied by vibrational spectroscopy of adsorbed species. *Catalysis Today*, Vol. 27: 497-532.
- [37] Liu, X.; Truitt, R. E., 1997, DRFT-IR Studies of the Surface of γ -Alumina. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 119: 9856-9860.
- [38] Lundie, D. T.; McInroy, A. R.; Marshall, R.; Winfield, J. M.; Jones, P.; Dudman, C. C.; Parker, S. F.; Mitchell, C.; Lennon, D., 2005, Improved description of the surface acidity of η -alumina. *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 109: 11592-11601.
- [39] Gribov, E. N.; Zavorotynska, O.; Agostini, G.; Vitillo, J. G.; Ricchiardi, G.; Spoto, G.; Zecchina, A., 2010, FTIR spectroscopy and thermodynamics of CO and H₂ adsorbed on γ -, δ - and α -Al₂O₃. *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 12: 6474-6482.
- [40] Wischert, R.; Copéret, C.; Delbecq, F.; Sautet, P., 2011, Dinitrogen: a selective probe for tri-coordinate Al "defect" sites on alumina. *Chemical Communications*, Vol. 47: 4890-4892.

مروری بر رفتار اکسیداسیون مکس فاز Ti_2AlC در

اتمسفر هوا

محمد هفتنی*^۱، مینا سعیدی حیدری^۲، حمیدرضا بهاروندی^۱، ناصر احسانی قماشلویی^۱

^۱ مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
^۲ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب



مهندس محمد هفتنی، نویسنده
مسئول مقاله، دانشجوی
کارشناسی ارشد دانشگاه
صنعتی مالک اشتر

Moh7tani@gmail.com

چکیده: در حال حاضر کاربرد سه گانه Ti_2AlC به عنوان پرکاربردترین مکس فاز در دمای بالا مورد توجه است و برای استفاده از آن در دمای بالا نیاز به شناخت صحیح در خصوص ویژگی‌های اکسیداسیون آن می‌باشد. از این رو در این مقاله تلاش شده است تا ضمن معرفی خواص و کاربردهای این مکس فاز، رفتار اکسیداسیون آن در دمای بالا مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور ابتدا رفتار اکسیداسیون Ti_2AlC به صورت کلی بیان شده و در ادامه مکانیسم اکسیداسیون آن شرح داده شده است. کلمات کلیدی: مکس فاز، Ti_2AlC ، کاربرد دمای بالا، اکسیداسیون

۱- مقدمه

مکس فازها^۱ دسته‌ای جدیدی از مواد هستند که اولین بار در دهه‌ی ۱۹۶۰ توسط نووتنی^۲ و همکارانش تحت عنوان "مواد فاز H" به دنیا معرفی شدند [۱، ۲]. اوج شکوفایی این مواد در اواسط دهه‌ی ۱۹۹۰ رخداد، هنگامی که بارسوم^۳ و همکارانش نمونه‌ی نسبتاً خالصی از این مواد را که ترکیبی از خواص سرامیک‌ها و فلزات داشت سنتز کردند [۲-۴]. مکس فازها که دارای ساختار بلوری هگزاگونال می‌باشند [۵، ۶]، سرامیک‌های نانو لایه‌ای با فرمول عمومی $M_{n+1}AX_n$ هستند. در این فرمول حرف M نشان‌دهنده‌ی یک فلز انتقالی می‌باشد. حرف A یک عنصر از گروه‌های IIIA یا IVA را نشان می‌دهد و حرف X نماینده‌ی کربن و یا نیتروژن است [۶-۱۰]. بسته به مقدار اندیس n، فازهای مکس به سه دسته‌ی کلی دویست و یازده (۲۱۱)، سیصد و دوازده (۳۱۲) و چهارصد و سیزده (۴۱۳) تقسیم‌بندی می‌شوند [۱، ۲، ۱۱].

این مواد که تاکنون به شکل‌های مختلف اعم از پودر، مواد بالک، پوشش، لایه نازک و فوم‌های فلزی تولید شده‌اند [۱۲]، ترکیبی از خواص سرامیک‌ها و فلزات را به طور همزمان از خود بروز می‌دهند [۳، ۱۳، ۱۴]. آن‌ها مانند سرامیک‌ها دارای دانسیته‌ی پایین، ضریب انبساط حرارتی کم، مدول الاستیک بالا و استحکام زیاد هستند و مثل فلزات هدایت الکتریکی و حرارتی خوب، مقاومت بالا به شوک حرارتی و قابلیت ماشین‌کاری مناسبی دارند [۱۵]. در شکل ۱ ماشین‌کاری یک نمونه از مکس فازها نشان داده شده است.

این ترکیب منحصربه‌فرد خواص به همراه مقاومت به خستگی [۱۶-۱۸] و خزش [۱۹-۲۱] و گذار از حالت ترد به نرم در دماهای بالا [۱۹] که در برخی از آن‌ها گزارش شده است، مکس فازها را به گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای دما بالا تبدیل کرده است [۶، ۲۲]؛ اما باید توجه کرد که یکی از مهم‌ترین خواص مورد نیاز برای استفاده از یک ماده در دمای بالا مقاومت به اکسیداسیون خوب

^۱ MAX phases

^۲ Novotny

^۳ Barsom

^۴ BPT

است و مکس فازهای متعددی دارای این ویژگی می‌باشند که از پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به Ti_2AlC اشاره کرد [۲۳-۲۵]. در این مقاله سعی شده است تا علاوه بر معرفی مکس فاز Ti_2AlC ، مقاومت به اکسیداسیون آن نیز بررسی شود. به همین منظور و برای دستیابی به توانایی پیش‌بینی و کنترل رفتار این ماده در دماهای مختلف، خواص کلی اکسیداسیون مکس فاز Ti_2AlC و فرایند تشکیل فازهای مختلف در محدوده‌ی دمایی ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه مکانیسم اکسیداسیون این مکس فاز نیز مطالعه شده است.



شکل ۱- نمایی از یک مکس فاز در حین ماشین‌کاری [۱۲].

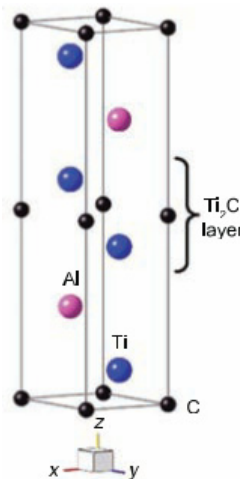
۲- معرفی مکس فاز Ti_2AlC

Ti_2AlC یک کاربید سه گانه با ساختار لایه‌ای و شبکه کریستالی هگزاگونال [۲۶] است. پارامتر شبکه، موقعیت Wyckoff و مختصات محل قرار گرفتن اتم‌ها مربوط در این ماده در جدول ۱ آورده شده است. البته در سایر منابع اعداد دیگری برای پارامتر شبکه این ماده گزارش شده است اما اختلاف آن‌ها در حد چند هزارم آنگستروم است [۲۷].

جدول ۱- مشخصات کریستالوگرافی مربوط به Ti_2AlC [۲۸]

پارامتر شبکه (nm)	اتم‌ها	موقعیت Wyckoff	مختصات داخلی
$a = 0.304$	Ti	4f	$0.0086/0.666/333$
$c = 1.36$	Al	2d	$0.075/0.666/333$
.	C	2a	.

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود Ti_2AlC دارای شبکه کریستالی هگزاگونال با گروه فضایی $p63/mmc$ می‌باشد که در بین هر لایه A، دو لایه اتمی Ti قرار گرفته است و مقدار ثوابت شبکه آن برابر با $a = 0.304 \text{ nm}$ و $c = 1.36 \text{ nm}$ است [۲۹، ۳۰].



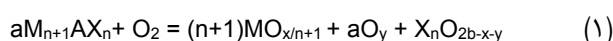
شکل ۲- ساختار کریستالی Ti_2AlC [۲۹].

خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب مهم‌ترین ویژگی مکس فاز Ti_2AlC است و باعث شده که این ماده تاکنون به عنوان پرکاربردترین فاز مکس مطرح شود. Ti_2AlC با چگالی $4/11 \text{ g/cm}^3$ به عنوان سبک‌ترین مکس فاز پایه تیتانیوم سری ۲۱۱ شناخته می‌شود [۱، ۳۱]. سختی، هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی این کاربید سه گانه در دمای اتاق به ترتیب $4-5 \text{ GPa}$ [۳۲]، $2/8 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [۳۲] و 46 W/mk گزارش شده است. هتینگر^۱ و همکارانش [۳۳] ضریب پواسون، مدول یانگ، برشی و بالک Ti_2AlC ساخته شده به روش زینتر بدون فشار را به ترتیب $0/19 \text{ GPa}$ ، 277 GPa و 118 GPa و 144 GPa گزارش کرده‌اند. بارسوم و همکارانش [۳۴] گزارش کرده‌اند که چنانچه Ti_2AlC با استفاده از پرس داغ پودرهای TiC ، Al ، Ti و کربن فعال در دمای $1400 \text{ } ^\circ\text{C}$ و فشار 30 MPa به مدت یک ساعت، سنتز شود دارای اندازه دانه $15 \mu\text{m}$ خواهد بود و خواص استحکام فشاری، استحکام خمشی، تافنس شکست و سختی آن در دمای اتاق به ترتیب 670 MPa ، 384 MPa و $YMPa \cdot m^{1/2}$ و $4/2-5/YGPa$ حاصل شده است. این درحالی است که نتایج آزمایش‌های بارسوم و همکارانش [۳۲] روی نمونه‌هایی که به روش پرس همه جانبه داغ ساخته شده و دارای اندازه دانه ۲۰ تا ۲۵ میکرومتر هستند نشان می‌دهد که استحکام فشاری Ti_2AlC در دمای اتاق $540 \pm 21 \text{ Mpa}$ است. همچنین آن‌ها نشان دادند که با افزایش دما استحکام فشاری این ماده افت می‌کند به گونه‌ای که در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به مقدار ۴۳۵ و ۳۴۰ مگاپاسکال می‌رسد. در تحقیق دیگری که به وسیله بارسوم و همکارانش [۳۱] انجام شده است استحکام فشاری Ti_2AlC با اندازه دانه ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون، در دمای اتاق 393 MPa و در دمای $1150 \text{ } ^\circ\text{C}$ ، 250 MPa گزارش شده است [۳۱]. از دیگر مشخصات Ti_2AlC می‌توان به گذار ترد به نرم در دمای $1050 \text{ } ^\circ\text{C}$ [۳۵]، استحکام بالا هم در دمای محیط و هم در دماهای بالا، مقاومت به شوک حرارتی مناسب [۳۵] و مقاومت به خوردگی خوب [۳۶] اشاره کرد.

Ti_2AlC یکی از بهترین مکس فازها برای کاربردهای دمای بالا است که می‌توان آن را هم به صورت بالک و هم به صورت پوشش استفاده کرد [۳۷، ۳۸]. از جمله دلایل تقاضای زیاد برای کاربرد Ti_2AlC می‌توان به هزینه کم مواد اولیه، چگالی پایین و توانایی خودترمیم شوندهی ترک در آن اشاره کرد [۱۲]. یانگ^۱ و همکارانش [۳۹] در تحقیقات خود نشان دادند شیارها و حفرات سطحی Ti_2AlC که دارای عرض کمتر از $10 \mu\text{m}$ باشند می‌توانند پس از ۲۰ ساعت اکسیداسیون در دمای $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ توسط Al_2O_3 چگال پر شوند.

۳- خواص کلی اکسیداسیون مکس فاز Ti_2AlC

در اکثر موارد اکسیداسیون مکس فازها بر اساس معادله (۱) اتفاق می‌افتد؛ بنابراین مقاومت به اکسیداسیون هر مکس فاز به ماهیت لایه اکسیدی که روی آن تشکیل می‌شود بستگی دارد.



وانگ^۲ و ژو^۳ [۲۶] مقاومت به اکسیداسیون مکس فاز Ti_2AlC را بسیار بهتر از آلیاژهای تیتانیوم-آلومینیوم و حتی سایر مکس فازها گزارش کرده‌اند. علت اصلی این مقاومت مناسب نسبت به اکسید شدن را می‌توان تشکیل یک لایه Al_2O_3 روی سطح دانست [۲۳، ۲۵]. چسبندگی فوق‌العاده لایه Al_2O_3 باعث می‌شود که بتواند به خوبی از زیر لایه Ti_2AlC در مقابل اکسیداسیون محافظت نماید [۲۲، ۴۰]. استحکام چسبندگی زیر لایه و لایه اکسیدی بیش از 85 MPa اعلام شده است که به طور قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از چسبندگی آلومینا به سایر زیر لایه‌ها است [۴۱]. در مطالعاتی که سانبرگ^۴ و همکارانش [۴۲] روی لایه آلومینایی فاقد ترک و پایدار انجام دادند، مشاهده کردند که این لایه حتی بعد از ۸۰۰۰ سیکل حرارتی بین دمای محیط و $1350 \text{ } ^\circ\text{C}$ پوسته پوسته نشده است. این مقاومت بی‌نظیر لایه اکسیدی را می‌توان ناشی از نزدیک بودن ضریب انبساط حرارتی [۴۰، ۴۳، ۴۴] و چگالی [۴۴، ۲۶] Al_2O_3 و Ti_2AlC دانست. تحقیقات بایون^۵ و همکارانش [۲۲] وجود مقدار کمی تنش پسماند

¹ Hettinger

¹ Yang

² Wang

³ Zhou

⁴ Sundberg

⁵ Byeon

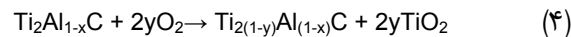
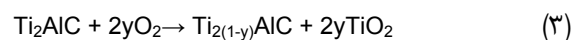
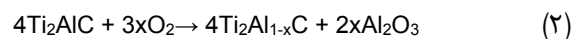
فشاری را روی لایه Al_2O_3 تأیید می‌کند. بزرگی این تنش با تغییر دما و زمان اکسیداسیون تغییر کرده و برای نمونه اکسید شده در دمای $1400^\circ C$ به بیش‌ترین مقدار خود یعنی $0.65 GPa$ می‌رسد. وجود این تنش پسماند فشاری می‌تواند به عنوان یکی از دلایل چسبندگی مناسب Al_2O_3 به زمینه در نظر گرفته شود.

لایه آلومینایی ایجاد شده روی Ti_2AlC علاوه بر محافظت زمینه در برابر اکسیداسیون می‌تواند نقش‌های مفید دیگری نیز ایفا نماید. لی^۱ و همکارانش [۷] در تحقیقاتی که به منظور بررسی اتصال قطعات Ti_2AlC در دمای بالا صورت گرفت، گزارش کردند که علت اصلی ایجاد پیوندی مستحکم بین قطعاتی از این جنس در دمای $1400^\circ C$ به وجود آمدن لایه‌ای آلومینایی در فصل مشترک قطعات است.

۴- مکانیسم اکسیداسیون مکس فاز Ti_2AlC

بر اساس مطالعات انجام‌شده اکسیداسیون آلیاژها و کامپوزیت‌ها دو مرحله دارد؛ اول تجزیه اکسیژن و دوم تشکیل لایه اکسیدی. در مرحله اول اکسیداسیون، اکسیژن مولکولی از فاز گاز جذب سطح آلیاژ شده و تجزیه می‌شود و در مرحله دوم یک لایه نازک پیوسته روی سطح ایجاد شده و رشد می‌کند [۲۶]. بررسی رفتار اکسیداسیون آلیاژهای $Ti-Al$ در هوا نشان می‌دهد که در محدوده دمایی 1100 تا 1300 درجه سانتی‌گراد فقط در مناطق غنی از آلومینیوم یک لایه محافظ تشکیل شده و در سایر مناطق پوسته‌هایی که مخلوطی از Al_2O_3 و TiO_2 است ایجاد شده است [۲۹].

در اکسیداسیون Ti_2AlC نیز دو مرحله وجود دارد. در ابتدا فشار جزئی اکسیژن در فصل مشترک هوا و Ti_2AlC به اندازه‌ای است که Ti و Al می‌توانند به صورت هم‌زمان اکسید شده و روی سطح Ti_2AlC فازهای TiO_2 و Al_2O_3 را به وجود آورند [۲۶]. واکنش‌های مربوط به تشکیل اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیوم را می‌توان به صورت واکنش‌های ۲ تا ۴ خلاصه کرد [۴۵].



بر اساس واکنش‌های ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود که از میان اکسیدهای مختلف تیتانیوم، TiO_2 (روتایل) تشکیل می‌شود [۲۳]. از آنجا که سینتیک رشد TiO_2 بیش از Al_2O_3 است دانه‌های TiO_2 بزرگ‌تر از دانه‌های Al_2O_3 می‌شوند [۴۶]. با افزایش زمان اکسیداسیون فشار جزئی اکسیژن در مرز Ti_2AlC و لایه اکسیدی کاهش می‌یابد و چون از لحاظ ترمودینامیکی انرژی تشکیل Al_2O_3 کمتر از TiO_2 است [۴۵، ۴۷]، رشد TiO_2 متوقف می‌شود اما رشد Al_2O_3 که به اکسیژن کمتری نیاز دارد همچنان ادامه می‌یابد [۲۶]. این در حالی است که مقدار آلومینیوم موجود در Ti_2AlC بسیار کمتر از مقدار آن در آلیاژهای $Ti-Al$ است و به همین دلیل نباید انتظار داشت هیچ لایه پیوسته‌ای از Al_2O_3 در سطح آن به وجود آید. با این حال همان‌طور که قبلاً بیان شد همواره یک لایه آلومینایی پیوسته روی زیرلایه Ti_2AlC مشاهده می‌شود [۲۹]. در توجیه این پدیده می‌توان به نتایج تحقیقات وانگ^۱ و همکارانش [۴۸] اشاره کرد. آن‌ها با انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که Ti_2AlC می‌تواند ساختار کریستالی خود را حتی در ترکیب $Ti_2Al_{0.5}C$ حفظ نماید [۴۹]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این ماده پس از قرار گرفتن در محیط اکسید کننده به راحتی می‌تواند مقدار آلومینیوم مورد نیاز برای تشکیل لایه آلومینایی را تامین کند.

پس از تشکیل لایه پیوسته آلومینایی به علت نفوذپذیری کم Ti در Al_2O_3 ، نفوذ Ti به سمت بیرون متوقف می‌شود، لذا از این پس فقط رشد لایه آلومینایی ادامه می‌یابد. در نتیجه نفوذ اکسیژن از طریق لایه Al_2O_3 به سمت داخل و نفوذ Al از زمینه به سمت بیرون به دو عامل تعیین‌کننده تبدیل می‌شوند. بدین ترتیب در دماهای بالا با وقوع بهتر پدیده نفوذ ضخامت لایه Al_2O_3 افزایش می‌یابد و تنها در بخش‌های کوچکی از سطح اکسید شده، TiO_2 مشاهده می‌شود [۳۷، ۵۰]. بنابراین می‌توان ادعا کرد که پس از تشکیل یک لایه نازک آلومینایی در سطح، اکسیداسیون از طریق یک مکانیزم نفوذی اتفاق می‌افتد.

¹ Li
¹ Wang

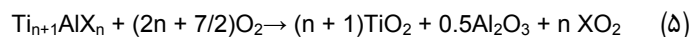
وجود ساختار دو لایه اکسیدی روی Ti_2AlC در دمای بیش از $1000^\circ C$ که قبلا به آن اشاره شد، نشان دهنده وقوع پدیده اکسیداسیون انتخابی آلومینیوم در اکسیداسیون Ti_2AlC است [۳۸]. نتایج تحقیقات ژو و سان [۵۱] نشان داد در حالی که پیوند بین لایه‌های آلومینیوم و لایه‌های Ti_2C در Ti_2AlC از نوع فلزی است، پیوند بین تیتانیوم و کربن در کاربرد سه گانه Ti_2AlC از نوع کوولانت است. بنابراین پیوند بین تیتانیوم و آلومینیوم نسبتا ضعیف است و همین امر سبب کمتر شدن اکتیویته آلومینیوم نسبت به تیتانیوم شده و در نهایت منجر به اکسیداسیون انتخابی آلومینیوم در Ti_2AlC می‌شود. بر اساس نظریه وانگر افزایش آلومینیوم محتوی زیرلایه، قدرت نفوذ زیاد Al و قدرت نفوذ و انحلال کم اکسیژن در زیرلایه برای اکسیداسیون بیرونی Al مناسب است. لیاو^۱ و همکارانش [۵۲] در تحقیقات خود نشان دادند سد انرژی حرکت جاهای خالی آلومینیوم، تیتانیوم و کربن در Ti_2AlC به ترتیب 0.83 ، 2.38 و 3 الکترون ولت است. بنابراین قدرت نفوذ آلومینیوم بیش از دو ماده دیگر می‌باشد و زمانی که این ماده در یک محیط اکسید کننده قرار می‌گیرد؛ یون‌های آلومینیوم از لایه آلومینایی به سمت بیرون نفوذ می‌کنند. همچنین وجود ناخالصی‌هایی مثل اکسیژن و نیتروژن که از طریق هوا می‌توانند وارد ساختار Ti_2AlC شوند، باعث ضعیف شدن پیوند بین تیتانیوم و آلومینیوم و در نتیجه افزایش جاهای خالی آلومینیوم در ساختار می‌شوند [۵۳]. از طرف دیگر هیچ منطقه فقیر از آلومینیوم یا غنی از تیتانیوم یا اکسیژن در زیر لایه Ti_2AlC مشاهده نمی‌شود که نشان گر قدرت نفوذ زیاد آلومینیوم و انحلال پذیری کم اکسیژن در آن می‌باشد. در نتیجه هم قدرت نفوذ زیاد Al و هم انحلال پذیری کم اکسیژن در زیرلایه Ti_2AlC شرایط را برای اکسیداسیون بیرونی Al فراهم می‌کند [۲۶، ۴۸]. تقریبا همه منابع در بیان علت اینکه چرا لایه اکسید تیتانیوم در بخش خارجی و لایه آلومینایی در قسمت داخلی تشکیل می‌شود به قدرت پیوند Ti-C و Al-C در ساختار Ti_2AlC اشاره کرده‌اند [۲۶، ۳۷، ۵۴]. بر اساس نظر راتو^۱ و همکارانش [۵۴] از آنجا که پیوند بین Ti و C در Ti_2AlC قوی‌تر از پیوند بین Al و C است، در ابتدای اکسیداسیون فقط جوانه‌های Al_2O_3 به وجود می‌آیند. سپس این جوانه‌ها رشد کرده و یک لایه اکسید سطحی ایجاد می‌کنند. با وقوع این فرایند آلومینیوم‌های موجود در سطح Ti_2AlC مصرف شده و سطح زیرلایه از آلومینیوم تهی می‌شود. در این مرحله اتم‌های Ti با عبور از لایه آلومینایی به سمت بیرون نفوذ کرده و لایه‌ای از جنس TiO_2 روی آن ایجاد می‌کنند. آن‌ها همچنین مسیر نفوذ تیتانیوم را علاوه بر مرزخانه‌ها، لایه‌های غنی از تیتانیوم که خوشه‌های Al_2O_3 به صورت تصادفی در آن‌ها پخش شده‌اند، گزارش کردند.

بارسوم [۲۳] در سال ۲۰۰۱ تلاش کرد فرایند اکسیداسیون دسته‌ای از مکس فازها با فرمول عمومی $Ti_{n+1}AlX_n$ ($n = 1-3$ and $X = C, N$) را مدل‌سازی کند. بر اساس این مدل سه مرحله را می‌توان برای اکسیداسیون این مکس فازها در نظر گرفت که شماتیک آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

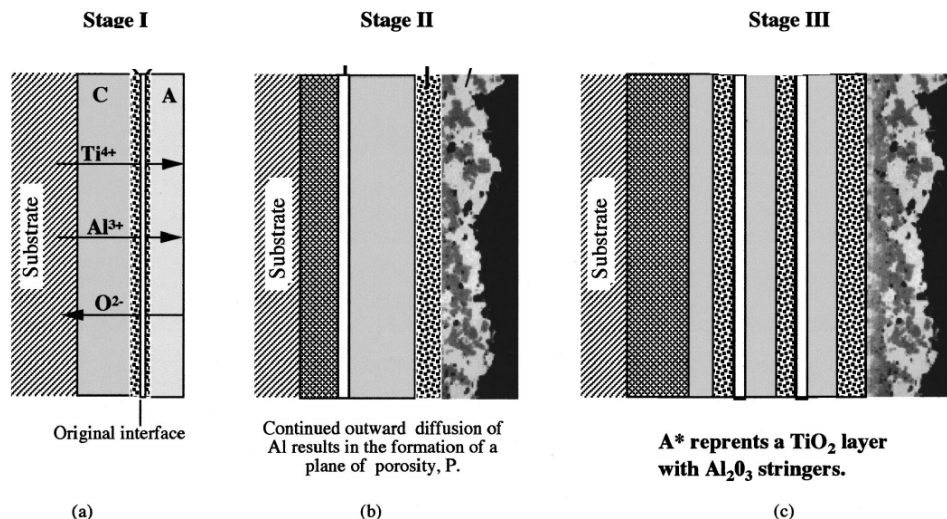
در مرحله ۱ که در شکل ۳-ا نشان داده شده است معمولا پس از اینکه زمینه به صورت کوتاه مدت و یا در دمای پایین در معرض هوا قرار بگیرد، ساختاری چهار لایه روی آن تشکیل می‌شود. خارجی‌ترین لایه روتایل است که در آن مقدار بسیار کمی Al_2O_3 حل شده است و یا اینکه اصلا Al_2O_3 در آن حل نشده است (لایه A). به دنبال این لایه یک لایه دیگر با نام B قرار دارد که مخلوطی از دو فاز Al_2O_3 و TiO_2 است. در این لایه کسر حجمی Al_2O_3 بیش از حد مورد انتظار است. افزایش مقدار Al_2O_3 در این لایه از تجزیه^۲ لایه زیرین $(Ti_{1-y}Al_y)O_{2-y/2}$ که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، نشئت می‌گیرد. نفوذ سریع Ti^{+4} و Al^{+3} ، معمولا منجر به تشکیل یک ترک، شکاف و یا منفذ می‌شود که توسط P در شکل ۳ مشخص شده است. این منافذ احتمالا از رسوب حفره‌ها حاصل می‌شوند یعنی حفره‌های کرکندال.

در طول مرحله II، تمام لایه‌ها از جمله لایه P، همچنان با نفوذ O^{+2} به داخل و نفوذ به بیرون Al^{+3} و Ti^{+4} رشد می‌کنند. ضخامت لایه P افزایش می‌یابد و به داخل حرکت می‌کند. این پدیده فقط می‌تواند با از بین رفتن منافذ و حفره‌ها در محل اصلی خود در اثر زینتر رخ دهد. علاوه بر این، به دلیل اثر تجزیه، لایه B نسبت به لایه C ضخیم‌تر می‌شود. گاهی اوقات، در طول این مرحله لایه پنجم (لایه D) نیز تشکیل می‌شود. این لایه هم مخلوطی از دو فاز Al_2O_3 و TiO_2 است، اما با اختلاط کمتر نسبت به لایه B و مقداری Al_2O_3 اضافی که از واکنش ۵ قابل پیش بینی است.

¹ Liao
¹ Rao
² demixing



در طول این مرحله، جزایر Al_2O_3 به نفوذ به خارج خود در درون یا نزدیک مرز اولیه ادامه می‌دهند و استرینگرها^۱ را در لایه A تشکیل می‌دهند (مناطق تاریک در لایه A که در اینجا با A* در شکل ۳ مشخص شده است). به نظر می‌رسد که ادامه نفوذ Al^{+3} (و احتمالاً Ti^{+4}) به خارج عامل تشکیل حفره‌ها است. مرحله سوم تنها در زمان‌های بیشتر و بالاترین دماها مشاهده شده است و با حضور لایه‌های خط دار متعدد که در آن‌ها لایه‌های C با لایه‌های B و P به طور متناوب قرار دارند، مشخص می‌شود.



شکل ۳- نمایش شماتیک اکسیداسیون مکس فاز Ti_2AlC در سه مرحله: (a) مرحله اول، (b) مرحله دوم، (c) مرحله سوم [۲۳].

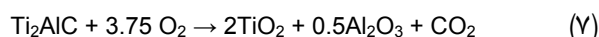
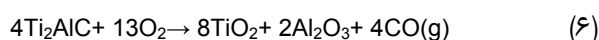
بارسوم و همکارانش [۲۴] تلاش کردند نتایج آزمایش‌های تجربی خود را با مدل ارائه شده تطبیق دهند. مسئله قابل تامل در این بررسی این است که همه ترکیبات سه مرحله مشخص شده در بالا را از خود نشان نمی‌دهند. به عنوان مثال، Ti_2AlC و $\text{Ti}_2\text{AlC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$ تنها مرحله I و II را نشان می‌دهند در حالی که در بررسی اکسیداسیون Ti_3AlC_2 هر سه مرحله را می‌توان مشاهده نمود. آن‌ها با تاکید بر اینکه شواهد تجربی به صراحت نشان می‌دهد که همه لایه‌ها از A تا D و P، در ابتدا با گذشت زمان رشد می‌کنند، نتیجه گرفتند که فرآیند اکسیداسیون باید با نفوذ به سمت داخل اکسیژن و نفوذ به بیرون از Al^{+3} و Ti^{+4} اتفاق بیفتد [۲۳]. همچنین آن‌ها اکسیداسیون Ti_2AlC را همواره در مرحله ۲ مدل ارائه شده گزارش کردند.

نکته قابل توجه دیگری که در بررسی مکانیسم اکسیداسیون Ti_2AlC باید در نظر گرفته شود، توجه به نقش کربن در زمان اکسیداسیون است. بی شک حضور کربن در ساختار Ti_2AlC بر رفتار اکسیداسیون آن اثر می‌گذارد زیرا ویژگی‌های اکسیداسیون Ti_2AlC با رفتار اکسیداسیون آلیاژهای تیتانیوم - آلومینیوم و Ti_2AlN متفاوت است [۵۵]. در مورد سرنوشت کربن در اکسیداسیون Ti_2AlC باید گفت چون عناصر تیتانیوم و آلومینیوم با اکسیژن واکنش می‌دهند کربن می‌تواند به یکی از دو شکل اکسیدهای CO و CO_2 یا کاربید و گرافیت در ساختار وجود داشته باشد. مطالعات انجام شده به وسیله SEM هیچ گونه تغییر در ترکیب شیمیایی در نواحی زیرین لایه اکسیدی را نشان نمی‌دهد. بنابراین کربن موجود در ساختار Ti_2AlC نیز اکسید می‌شود. ماهیت دقیق این اکسید هنوز مشخص نیست اما محتمل‌ترین پیش بینی این است که کربن به شکل CO در مرز بین لایه اکسیدی و زیرلایه قرار می‌گیرد. سپس CO از طریق عیوب کریستالی لایه اکسیدی مثل ترک‌ها و مرزهای دانه خود را به سطح آزاد رسانده و به CO_2 تبدیل می‌شود. همچنین وجود CO می‌تواند با افزایش انتقال اکسیژن از طریق ایجاد جاهای خالی اکسیژن باعث افزایش تشکیل لایه پیوسته آلومینایی شود [۳۸].

بر طبق تحلیل ارائه شده واکنش اکسیداسیون مکس فاز Ti_2AlC را می‌توان به صورت واکنش ۶ بیان نمود [۲۶]. در حالی که بارسوم و همکارانش [۲۴] محتمل‌ترین معادله برای اکسیداسیون Ti_2AlC را به صورت واکنش ۷ بیان کردند. البته براساس

¹ stringers

تحقیقات آن‌ها ماهیت دقیق گازی که تشکیل می‌شود هنوز ناشناخته است؛ اما به منظور به تعادل رسیدن واکنش‌ها می‌توان فرض کرد که این گاز CO₂ باشد. در این واکنش فرض بر آن است که عناصر غیر فلزی از طریق لایه‌های واکنش نفوذ می‌کنند و اکسید می‌شوند.



همان طور که ذکر شد چنانچه Ti₂AlC در دمای ۱۴۰۰°C در معرض هوا قرار بگیرد فاز Al₂TiO₅ نیز روی سطح آن مشاهده می‌شود [۴، ۲۳]. تشکیل این فاز که با افزایش حجمی معادل ۱۰/۸٪ همراه است.

بر اساس تحقیقاتی که فردنبرگ^۱ و همکارش [۵۶] در سال ۱۹۸۷ و به منظور بررسی تشکیل Al₂TiO₅ از مخلوط‌پودرهای Al₂O₃ و TiO₂ انجام دادند، مشخص شد که در دمای ۱۵۸۰K انرژی آزاد تشکیل Al₂TiO₅ کم بوده و این ماده از یک واکنش دو مرحله‌ای^۲ بین Al₂O₃ و TiO₂ به وجود می‌آید. در بخش اول واکنش که سرعت نسبتاً زیادی دارد، جوانه‌زنی و رشد سلول‌های Al₂TiO₅ در مخلوط واکنش نکرده TiO₂ و Al₂O₃ اتفاق می‌افتد. آن‌ها محل‌های جوانه‌زنی را مستقل از دما دانستند و حدس زدند که احتمالاً محل جوانه‌زنی به ناخالصی‌های باقیمانده وابسته است. در این مرحله از واکنش وجود TiO₂ واکنش نکرده نیز گزارش شده است که یک مسیر نفوذ مناسب برای انتقال سریع مواد در حین رشد سلول‌ها به وجود می‌آورد. در مرحله دوم TiO₂ و Al₂O₃ محبوس شده در نواحی مختلف به علت رشد اولیه Al₂TiO₅، از طریق یک فرایند نفوذی از بین می‌روند.

مراجع

- [1] Z. Sun, Progress in research and development on MAX phases: a family of layered ternary compounds, *International Materials Reviews*, Vol. 56, No. 3, pp. 143-166, 2011.
- [2] M. W. Barsoum, The M N+ 1 AX N phases: a new class of solids: thermodynamically stable nanolaminates, *Progress in Solid State Chemistry*, Vol. 28, No. 1, pp. 201-281, 2000.
- [3] P. Eklund, M. Beckers, U. Jansson, H. Högberg, L. Hultman, The M n+ 1 AX n phases: materials science and thin-film processing, *Thin Solid Films*, Vol. 518, No. 8, pp. 1851-1878, 2010.
- [4] C. Bai, R. Sa, D. D. Jayaseelan, F. Inam, M. J. Reece, W. E. Lee, Microstructural evolution during high-temperature oxidation of spark plasma sintered Ti 2 AlN ceramics, 2012.
- [5] I. R. Shein, A. L. Ivanovskii, Elastic properties of superconducting MAX phases from first-principles calculations, *physica status solidi (b)*, Vol. 248, No. 1, pp. 228-232, 2011.
- [6] I. M. Low, *Advances in Science and Technology of Mn+1AXn Phases*: Elsevier Science, 2012.
- [7] A. Li, C. Hu, M. Li, Y. Zhou, Joining of Ti-Al-C ceramics by oxidation at low oxygen partial pressure, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 29, No. 12, pp. 2619-2625, 2009.
- [8] J. Qin, D. He, C. Chen, J. Wang, J. Hu, B. Yang, Phase segregation of titanium-aluminum carbide (Ti 2 AlC) at high pressure and high temperature, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 462, No. 1, pp. L24-L27, 2008.
- [9] J. Yang, L. Pan, W. Gu, X. Gu, K. Song, T. Qiu, S. Zhu, Oxidation behavior and kinetics of in situ (TiB 2+ TiC)/Ti 3 SiC 2 composites in air, *Ceramics International*, Vol. 38, No. 1, pp. 159-168, 2012.
- [10] B. Anasori, N. C. El'ad, Y. Elraheb, M. W. Barsoum, On the oxidation of Ti 2 GeC in air, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 580, pp. 550-557, 2013.
- [11] Z. M. Sun, H. Hashimoto, Z. F. Zhang, S. L. Yang, S. Tada, Synthesis and characterization of a metallic ceramic material-Ti₃SiC₂, *Materials transactions*, Vol. 47, No. 1, pp. 170-174, 2006.
- [12] M. Radovic, M. W. Barsoum, MAX phases: bridging the gap between metals and ceramics, *American Ceramics Society Bulletin*, Vol. 92, No. 3, pp. 20-27, 2013.
- [13] M. W. Barsoum, T. El-Raghy, The MAX Phases: Unique New Carbide and Nitride Materials Ternary ceramics turn out to be surprisingly soft and machinable, yet also heat-tolerant, strong and lightweight, *Am. Scientist*, Vol. 89, No. 4, pp. 33443, 2001.
- [14] M. Barsoum, Physical properties of the MAX phases, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 1, 2006.
- [15] R. Riedel, I. W. Chen, *Ceramics Science and Technology, Materials and Properties*: Wiley, 2011.
- [16] C. Gilbert, D. Bloyer, M. Barsoum, T. El-Raghy, A. Tomsia, R. Ritchie, Fatigue-crack growth and fracture properties of coarse and fine-grained Ti 3 SiC 2, *Scripta Materialia*, Vol. 42, No. 8, pp. 761-767, 2000.
- [17] D. Chen, K. Shirato, M. W. Barsoum, T. El-Raghy, R. O. Ritchie, Cyclic Fatigue-Crack Growth and Fracture Properties in Ti₃SiC₂ Ceramics at Elevated Temperatures, *Journal of the American Ceramic*

¹ Freudenberg

² Two reaction stages

- Society*, Vol. 84, No. 12, pp. 2914-2920, 2001.
- [18] H. Zhang, Z. Wang, Q. Zang, Z. Zhang, Z. Sun, Cyclic fatigue crack propagation behavior of Ti₃SiC₂ synthesized by pulse discharge sintering (PDS) technique, *Scripta materialia*, Vol. 49, No. 1, pp. 87-92, 2003.
- [19] M. Radovic, M. Barsoum, T. El-Raghy, S. Wiederhorn, W. Luecke, Effect of temperature, strain rate and grain size on the mechanical response of Ti₃SiC₂ in tension, *Acta materialia*, Vol. 50, No. 6, pp. 1297-1306, 2002.
- [20] M. Radovic, M. Barsoum, T. El-Raghy, S. Wiederhorn, Tensile creep of coarse-grained Ti₃SiC₂ in the 1000–1200° C temperature range, *Journal of Alloys and compounds*, Vol. 361, No. 1, pp. 299-312, 2003.
- [21] M. W. Barsoum, M. Radovic, Elastic and mechanical properties of the MAX phases, *Annual review of materials research*, Vol. 41, pp. 195-227, 2011.
- [22] J. Byeon, J. Liu, M. Hopkins, W. Fischer, N. Garimella, K. Park, M. Brady, M. Radovic, T. El-Raghy, Y. Sohn, Microstructure and residual stress of alumina scale formed on Ti₂AlC at high temperature in air, *Oxidation of metals*, Vol. 68, No. 1-2, pp. 97-111, 2007.
- [23] M. Barsoum, Oxidation of Ti_n+1Al_Xn (n= 1, 3 and X= C, N) I. Model, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 148, No. 8, pp. C544-C550, 2001.
- [24] M. Barsoum, N. Tzenov, A. Procopio, T. El-Raghy, M. Ali, Oxidation of Ti_n+1Al_Xn (n= 1, 3 and X= C, N): II. Experimental Results, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 148, No. 8, pp. C551-C562, 2001.
- [25] M. Barsoum, L. Ho-Duc, M. Radovic, T. El-Raghy, Long time oxidation study of Ti₃SiC₂, Ti₃SiC₂/TiC composites in air, *Journal of the Electrochemical Society* [J. Electrochem. Soc.], Vol. 150, No. 4, 2003.
- [26] X. Wang, Y. Zhou, High-temperature oxidation behavior of Ti₂AlC in air, *Oxidation of Metals*, Vol. 59, No. 3-4, pp. 303-320, 2003.
- [27] B. Manoun, F. Zhang, S. Saxena, T. El-Raghy, M. Barsoum, X-ray high-pressure study of Ti₂AlN and Ti₂AlC, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 67, No. 9, pp. 2091-2094, 2006.
- [28] W. Jeitschko, H. Nowotny, F. Benesovsky, Carbon-containing ternary compounds (H-phase), *Monatsh. Chem*, Vol. 94, No. 4, pp. 672-6, 1963.
- [29] X. Wang, Y. Zhou, Layered machinable and electrically conductive Ti₂AlC and Ti₃AlC₂ ceramics: a review, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 385-416, 2010.
- [30] Z. Sun, A. Murugaiah, T. Zhen, A. Zhou, M. Barsoum, Microstructure and mechanical properties of porous Ti₃SiC₂, *Acta materialia*, Vol. 53, No. 16, pp. 4359-4366, 2005.
- [31] M. W. Barsoum, D. Brodtkin, T. El-Raghy, Layered machinable ceramics for high temperature applications, *Scripta Materialia*, Vol. 36, No. 5, pp. 535-541, 1997.
- [32] M. Barsoum, T. El-Raghy, M. Ali, Processing and characterization of Ti₂AlC, Ti₂AlN, and Ti₂AlC_{0.5}N_{0.5}, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31, No. 7, pp. 1857-1865, 2000.
- [33] J. Hettinger, S. Lofland, P. Finkel, T. Meehan, J. Palma, K. Harrell, S. Gupta, A. Ganguly, T. El-Raghy, M. Barsoum, Electrical transport, thermal transport, and elastic properties of M₂AlC (M= Ti, Cr, Nb, and V), *Physical Review B*, Vol. 72, No. 11, pp. 115120, 2005.
- [34] M. Barsoum, I. Salama, T. El-Raghy, J. Golczewski, H. Seifert, F. Aldinger, W. Porter, H. Wang, Thermal and electrical properties of Nb₂AlC, (Ti, Nb) ₂AlC and Ti₂AlC, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33, No. 9, pp. 2775-2779, 2002.
- [35] Y. Zhou, X. Wang, Deformation of polycrystalline Ti₂AlC under compression, *Material Research Innovations*, Vol. 5, No. 2, pp. 87-93, 2001.
- [36] V. Jovic, B. Jovic, S. Gupta, T. El-Raghy, M. Barsoum, Corrosion behavior of select MAX phases in NaOH, HCl and H₂SO₄, *Corrosion science*, Vol. 48, No. 12, pp. 4274-4282, 2006.
- [37] S. Basu, N. Obando, A. Gowdy, I. Karaman, M. Radovic, Long-Term Oxidation of Ti₂AlC in Air and Water Vapor at 1000–1300° C Temperature Range, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 159, No. 2, pp. C90-C96, 2011.
- [38] M. Sonestedt, J. Frodelius, M. Sundberg, L. Hultman, K. Stiller, Oxidation of Ti₂AlC bulk and spray deposited coatings, *Corrosion Science*, Vol. 52, No. 12, pp. 3955-3961, 2010.
- [39] H. Yang, Y. Pei, J. Rao, J. T. M. De Hosson, Self-healing performance of Ti₂AlC ceramic, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 22, No. 17, pp. 8304-8313, 2012.
- [40] Z. Lin, M. Zhuo, Y. Zhou, M. Li, J. Wang, Microstructural characterization of layered ternary Ti₂AlC, *Acta materialia*, Vol. 54, No. 4, pp. 1009-1015, 2006.
- [41] Z. Lin, M. Zhuo, Y. Zhou, M. Li, J. Wang, Microstructures and adhesion of the oxide scale formed on titanium aluminum carbide substrates, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 89, No. 9, pp. 2964-2966, 2006.
- [42] M. Sundberg, G. Malmqvist, A. Magnusson, T. El-Raghy, Alumina forming high temperature silicides and carbides, *Ceramics International*, Vol. 30, No. 7, pp. 1899-1904, 2004.
- [43] D. J. Tallman, B. Anasori, M. W. Barsoum, A critical review of the oxidation of Ti₂AlC, Ti₃AlC₂ and Cr₂AlC in Air, *Materials Research Letters*, Vol. 1, No. 3, pp. 115-125, 2013.
- [44] M. MUNRO, Evaluated Material Properties for a Sintered alpha-Alumina, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 80, No. 8, pp. 1919-1928, 1997.
- [45] G. Song, V. Schnabel, C. Kwakernaak, S. Van der Zwaag, J. Schneider, W. Sloof, High temperature oxidation behaviour of Ti₂AlC ceramic at 1200 C, *High temperature*, Vol. 29, No. 3, 2014.
- [46] J. Smialek, Kinetic Aspects of Ti₂AlC MAX Phase Oxidation, *Oxidation of Metals*, Vol. 83, No. 3-4, pp. 351-366, 2015.

- [47] A. Rahmel, P. Spencer, Thermodynamic aspects of TiAl and TiSi₂ oxidation: the Al-Ti-O and Si-Ti-O phase diagrams, *Oxidation of Metals*, Vol. 35, No. 1-2, pp. 53-68, 1991.
- [48] J. Wang, Y. Zhou, T. Liao, J. Zhang, Z. Lin, A first-principles investigation of the phase stability of Ti₂AlC with Al vacancies, *Scripta Materialia*, Vol. 58, No. 3, pp. 227-230, 2008.
- [49] J. Wang, Y. Zhou, T. Liao, J. Zhang, Z. Lin, Phase stability of Ti₂AlC suffering Al vacancy by first-principles investigations, *Scripta Mater*, Vol. 58, pp. 227, 2008.
- [50] R. Langensiepen, R. Tressler, P. Howell, A preliminary study of precipitation in Ti⁴⁺-doped polycrystalline alumina, *Journal of Materials Science*, Vol. 18, No. 9, pp. 2771-2776, 1983.
- [51] Y. Zhou, Z. Sun, Electronic structure and bonding properties of layered machinable Ti₂AlC and Ti₂AlN ceramics, *Physical Review B*, Vol. 61, No. 19, pp. 12570, 2000.
- [52] T. Liao, J. Wang, Y. Zhou, Ab initio modeling of the formation and migration of monovacancies in Ti₂AlC, *Scripta Materialia*, Vol. 59, No. 8, pp. 854-857, 2008.
- [53] T. Liao, J. Wang, Y. Zhou, First-principles investigation of intrinsic defects and (N, O) impurity atom stimulated Al vacancy in Ti (2) AlC, 2008.
- [54] J. Rao, Y. Pei, H. Yang, G. Song, S. Li, J. T. M. De Hosson, TEM study of the initial oxide scales of Ti₂AlC, *Acta Materialia*, Vol. 59, No. 13, pp. 5216-5223, 2011.
- [55] D. McIntyre, J. Greene, G. Håkansson, J. E. Sundgren, W. D. Münz, Oxidation of metastable single-phase polycrystalline Ti_{0.5}Al_{0.5}N films: Kinetics and mechanisms, *Journal of Applied Physics*, Vol. 67, No. 3, pp. 1542-1553, 1990.
- [56] B. Freudenberg, A. Mocellin, Aluminum Titanate Formation by Solid-State Reaction of Fine Al₂O₃ and TiO₂ Powders, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 70, No. 1, pp. 33-38, 1987.



arsouri@gmail.com

دکتر علیرضا سوری، نویسنده
مستول مقاله، عضو هیات علمی
دانشگاه ملایر، گروه مهندسی
مواد، دانشکده فنی و مهندسی

مقدمه‌ای بر مواد مکمل سیمانی - بخش ۱

علیرضا سوری

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر

چکیده: تولید سالیانه سیمان به حدود ۳ میلیارد تن رسیده است و پیش‌بینی می‌شود این رقم به ۴ میلیارد تن در سال برسد. رشد عمده در کشورهای مثل چین، هند و همچنین در کشورهای حوزه خاورمیانه و شمال آفریقا دیده می‌شود. همزمان صنعت سیمان با چالش‌هایی همچون افزایش قیمت منابع انرژی، الزامات زیست‌محیطی برای کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن و تامین مواد اولیه با کیفیت با مقادیر مناسب روبروست. مواد مکمل سیمانی می‌توانند به‌صورت بخشی جایگزین سیمان در بتن شوند. استفاده مناسب از مواد مکمل سیمانی می‌تواند باعث بهبود خواصی همچون کارپذیری بهتر، افزایش استحکام درازمدت و دوام بیشتر در محیط‌های مهاجم در بتن تازه و سخت شده گردد. در این بخش از مقاله انواع مواد مکمل سیمانی شرح داده شده و همچنین واکنش‌های پوزولانی و عوامل موثر بر آن‌ها و روش‌های فعال‌سازی متاکائولن به‌عنوان یک پوزولان طبیعی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: مواد مکمل سیمانی، پوزولان، متاکائولن، بتن

۱- مقدمه

در حال حاضر، مواد مکمل سیمانی (Supplementary Cementing Materials) به‌طور گسترده‌ای به‌صورت سیمان‌های مخلوط و همچنین به‌صورت افزودنی جداگانه در ملات و بتن استفاده می‌شوند. کاربرد چنین موادی هر روز بخاطر کارایی بهتر ساختار آن‌ها، دوستدار محیط زیست بودن و ملاحظات انرژی در حال افزایش است [۱].

مواد مکمل سیمانی شامل هم مواد پوزولانی و هم مواد هیدرولیکی می‌شوند. میکرو سیلیس (SF)، خاکستر بادی (FA)، سرباره گرانوله کوره بلند (GBFS) و محدوده وسیعی از پوزولان‌های طبیعی مثل متاکائولن (MK)، خاکستر آتشفشانی و خاک دیاتومه‌ای برخی از موادی هستند که معمولاً برای جایگزینی جزئی سیمان به‌عنوان مواد مکمل سیمانی استفاده می‌شوند. هر یک از این مواد ویژگی‌های مختلفی را در محصول نهایی به‌وجود می‌آورند که این ویژگی‌ها توسط پژوهش‌گرانی از سراسر دنیا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. درحالی‌که برخی از حوزه‌های پژوهشی مرتبط به‌دقت مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما بسیاری از ویژگی‌های چنین موادی در ملات و بتن هنوز باید مورد تحقیق قرار گیرند.

۲- مواد پوزولانی

پوزولان‌ها مواد سیلیسی یا سیلیسی و آلومینایی هستند که در حضور آب با هیدروکسید کلسیم (محصول هیدراسیون سیمان پرتلند) در دمای معمولی واکنش شیمیایی کرده و سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و برخی ترکیبات سیمانی دیگر تولید می‌کنند [۲]. پوزولان‌ها و سرباره عموماً به‌عنوان مواد مکمل سیمانی طبقه‌بندی می‌شوند. تقسیم‌بندی مواد پوزولانی بر اساس استاندارد ASTM در جدول ۱ آمده است. کاربرد آن‌ها نه تنها از منظر محیط‌زیستی و مصرف انرژی، بلکه از لحاظ فنی نیز مفید می‌باشند. این مواد می‌توانند بعنوان افزودنی و یا بجای بخشی از مواد سیمانی استفاده شوند.

ویژگی‌های فیزیکی چند نوع پوزولان که به‌طور معمول استفاده می‌شوند در مقایسه با سیمان پرتلند در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات و طبقه‌بندی مواد مکمل سیمانی

ASTM C 989	سربراره گرانوله شده از کوره ذوب آهن
درجه ۸۰	سربراره با فعالیت کم
درجه ۱۰۰	سربراره با فعالیت متوسط
درجه ۱۲۰	سربراره با فعالیت زیاد
ASTM C 618	خاکستر بادی و پوزولان‌های طبیعی
	پوزولان‌های طبیعی خام یا کلسینه شده شامل: دیاتومیت‌ها خاکسترهای آتشفشانی رس‌های کلسینه شده، شامل متاکائولن و شیل‌ها
کلاس N	
کلاس F	خاکستر بادی با خواص پوزولانی
کلاس C	خاکستر بادی با خواص سیمانی و پوزولانی
ASTM C 1240	میکروسیلیس

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی چند نوع پوزولان انتخاب شده و سیمان پرتلند [۳]

وزن مخصوص	شکل ذرات	سطح ویژه، m^2/g	متوسط اندازه ذرات، μ	مواد
۳/۲	گوشه‌دار، نامنظم	< ۱	۱۰-۱۵	سیمان پرتلند
۲/۲-۲/۴	عموما کروی	۱-۲	۱۰-۱۵	خاکستر بادی
۲/۲	کروی	۲۰-۲۵	۰/۱-۰/۳	میکروسیلیکا
۲/۴	صفحه‌ای	۱۵	۱-۲	متاکائولن

۳- واکنش پوزولانی

پوزولان‌ها موادی هستند که به خودی خود فاقد هرگونه خاصیت سیمانی می‌باشند، ولی در حضور آب با هیدروکسید کلسیم در دمای معمولی واکنش شیمیایی می‌دهند و ترکیباتی دارای خواص سیمانی شکل می‌دهند [۴]. هیدروکسید کلسیم محصول جانبی از هیدراسیون سیمان و بخشی از خمیر است که سنگدانه‌ها را بهم می‌چسباند و به دلایل زیر یک اتصال ضعیف در سیستم پایه سیمانی می‌باشد:

- هیدروکسید کلسیم در آب قابل حل و لذا مقدار خمیر را کم کرده و از این طریق ایجاد تخلخل، دانسیته خمیر را پایین می‌آورد.
 - کاهش دانسیته خمیر موجب افت استحکام شده و همچنین سیستم را در مقابل عناصر و مواد شیمیایی آسیب پذیرتر می‌سازد.
 - هیدروکسید کلسیم پس از انحلال به سطح سیستم پایه سیمانی رفته و با دی اکسید کربن موجود در هوا واکنش می‌کند و رسوب بادکرده سفیدی تشکیل می‌دهد که به اصطلاحاً شکفتگی خوانده می‌شود و در نتیجه، ظاهری ناخوشایند بوجود می‌آورد که برای رفع آن نیاز به صرف زمان و هزینه است.
 - هیدروکسید کلسیم باعث واکنش پذیری قلیایی-سیلیسی می‌گردد و سیستم پایه سیمانی را سست می‌نماید.
- مواد پوزولانی با داشتن واکنش‌هایی که در بالا نشان داده شد هیدروکسید کلسیم را به مواد سیمانی تبدیل کرده و لذا متجر به استحکام و دوام بهتر سیستم پایه سیمانی می‌گردند.

۴- عوامل موثر بر فعالیت پوزولانی

فعالیت پوزولانی به صورت: ظرفیت پوزولان برای تشکیل آلومینوسیلیکات‌های حاوی آهک بمنظور تشکیل محصولات سیمانی تعریف می‌شود. فعالیت یا واکنش‌پذیری پوزولان‌ها با هیدروکسید کلسیم به ویژگی‌های اساسی آن‌ها مانند ترکیب شیمیایی، بلورشناسی، تغییر شکل ساختاری، مقدار فاز آمورف و اندازه ذرات بستگی دارد. به طور کلی عواملی که فعالیت پوزولان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارتند از [۵]:

- ترکیب شیمیایی پوزولان (مقدار $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)

- ساختار بلورشناسی پوزولان (درجه آمورف بودن ساختار آن)

- ریزدانگی ذرات و سطح مخصوص آن

- مورفولوژی ذرات پوزولان

- نسبت فاز آمورف به فاز کریستالی در پوزولان

- درجه حرارت محیط

برای انجام واکنش شیمیایی، پوزولان‌ها باید آمورف باشند و هر چه مقدار $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ بیشتر باشد، فعالیت پوزولانی هم بیشتر خواهد بود. هرچه ذرات پوزولان ریزتر باشد یعنی سطح مخصوص بزرگتر است و در نتیجه سرعت واکنش بیشتر خواهد بود.

۵- پوزولان‌های طبیعی

پوزولان‌های طبیعی به شکل خاک کلسینه شده یا مخلوط شده با آهک برای قرن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اولین مورد استفاده از آن‌ها در آمریکای شمالی در محدوده رود آمازون در سال ۱۹۶۰ است، که در آن تقریباً ۳۰۰/۰۰۰ تن خاک رس کلسینه شده با سیمان پرتلند مخلوط شد و در پروژه سد سازی که نیاز به کاهش ایجاد گرما در بتن‌های حجیم وجود داشت استفاده گردید [۶]. علاوه بر جلوگیری از افزایش دما، افزایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی و جلوگیری از واکنش قلیایی-سیلیکاتی نیز از اهداف افزودن پوزولان‌های طبیعی به بتن است. بیشتر پوزولان‌های طبیعی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند، در کوره مورد عملیات حرارتی قرار گرفته و سپس به صورت پودر ریز آسیاب می‌شوند. برخی از پوزولان‌های طبیعی خام یا کلسینه‌شده عبارتند از:

- دیاتومیت‌ها

- خاکسترهای آتشفشانی

- رس‌های کلسینه شده، شامل متاکائولن و شیل‌ها

۶- متاکائولن

متاکائولن (MK) یک ماده پوزولانی است که از کلسینه شدن کائولن در دمای ۶۰۰ تا ۸۵۰ درجه سلسیوس با توجه به نوع کائولن بدست می‌آید [۷]. این پوزولان یکی از جدیدترین مصالح جایگزین سیمان برای تهیه بتن توانمند (HPC) محسوب می‌شود. حرارت دادن آب شیمیایی کائولن را خارج کرده، ساختار کریستالی آن را از بین برده و محصول تبدیل به یک سیلیکات آلومینیوم آمورف (AS_2) می‌شود. متاکائولن در واکنش با هیدروکسید کلسیم (CH) ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) را در دمای محیط ایجاد نموده و فازهای حاوی آلومینات شامل C_3AH_6 ، C_4AH_{13} و C_2ASH_8 را تولید می‌کند [۸].

متاکائولن از این نظر که نه محصول جانبی یک فرآیند صنعتی است و نه ماده‌ای کاملاً طبیعی، منحصر بفرد است. این ماده از مینرالی که به صورت طبیعی بوجود آمده مشتق می‌شود و مخصوصاً برای کاربردهای مواد مکمل سیمانی ساخته می‌شود. برخلاف پوزولان جانبی (پوزولانی که محصول جانبی است مانند خاکستر بادی یا دوده سیلیکا) که می‌تواند ترکیب متغیر داشته باشد، متاکائولن تحت شرایطی که به دقت کنترل می‌گردد تولید می‌شود. بنابراین می‌توان به درجه بالایی از خلوص و واکنش‌پذیری پوزولانی دست یافت.

منابع طبیعی کائولن در برخی کشورها از جمله ایران یافت می‌شوند. علاوه بر دیگر اجزاء مینرالی، اگر مقدار کائولینیت در ماده‌ای

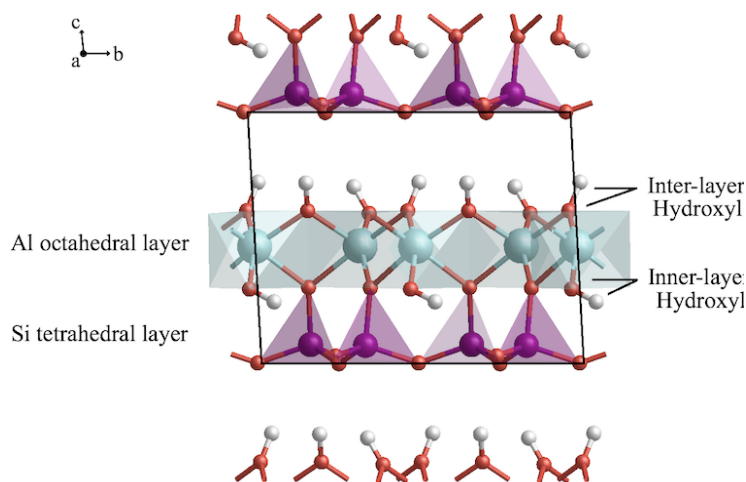
بیش از ۵۰ درصد آن را تشکیل دهد، آن ماده به عنوان سازنده و تشکیل دهنده کائولن در نظر گرفته می‌شود [۹]. متاکائولن پودری است نسبتاً سفید (سفیدی که در آن کمی رنگ زرد و یا خاکستری وجود دارد) و بیشتر از ترکیبات دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) و اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) تشکیل شده است. متاکائولن فاقد یا حاوی تنها مقادیر کمی اکسید کلسیم آزاد و قلیاها می‌باشد و بنابراین خودش ظرفیت هیدراته شدن را ندارد [۱۰ و ۱۱].

علاوه بر جنبه‌های کاربردی، کارهای تحقیقاتی روی متاکائولن در دو حوزه ساختار کائولن و تبدیل کائولن به متاکائولن ادامه دارد [۱۲]. برخی از مصارف متاکائولن عبارتند از:

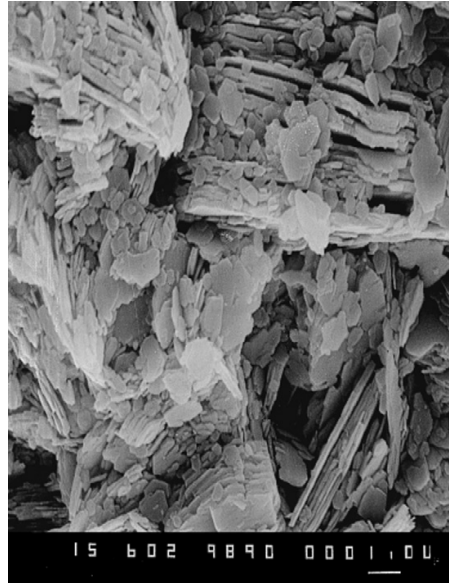
- بتن با عملکرد بالا، استحکام زیاد و سبک وزن
- بتن پیش ساخته برای مقاصد معماری، شهرسازی، صنعتی و ساختمانی
- بتن تقویت شده با الیاف شیشه‌ای
- ملات‌ها، اندودکاری، مواد تعمیری و پلاسترهای استخری
- مزایای استفاده از متاکائولن به شرح زیر می‌باشند:
- افزایش استحکام‌های کششی و فشاری
- کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت به خوردگی شیمیایی
- افزایش دوام (طول عمر) بتن
- کاهش اثرات واکنش پذیری قلیا- سیلیکا (ASR)
- کاهش انقباض به جهت تراکم بیشتر ذرات و در نتیجه بتن چگال تر
- بهبود قابلیت کارپذیری و پرداخت نهایی بتن
- سطح با کیفیت تر بتن، رنگ و ظاهر بهتر و استعداد کمتر برای وقوع پدیده شوره‌زدن

۷- روش‌های تولید متاکائولن

کائولن بعد از عملیات حرارتی مناسب منبع اصلی تولید متاکائولن است. کائولن یک فیلوسیلیکات است که شامل لایه‌های متناوبی از سیلیکا و آلومینا به ترتیب با کوئوردیناسیون تتراهدرال و اکتاهدرال می‌باشد [۱۳]. این ساختار کریستالی لایه‌ای از نظر الکتریکی خنثی است، که منجر به اندازه ذرات ریز و و مرفولوژی صفحه‌ای شکل می‌گردد و برای ذرات امکان حرکت آسان روی یکدیگر را فراهم می‌سازد [۱۴]. کائولینیت اصطلاح مینرالوژیکی دی‌سیلیکات آلومینیوم هیدراته، $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ یا $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ می‌باشد که اصلی‌ترین جز تشکیل دهنده کائولن است [۱۵]. در شکل ۱ طرح کلی ساختار کائولینیت و در شکل ۲ ریز ساختار یک نوع کائولن نشان داده شده است.

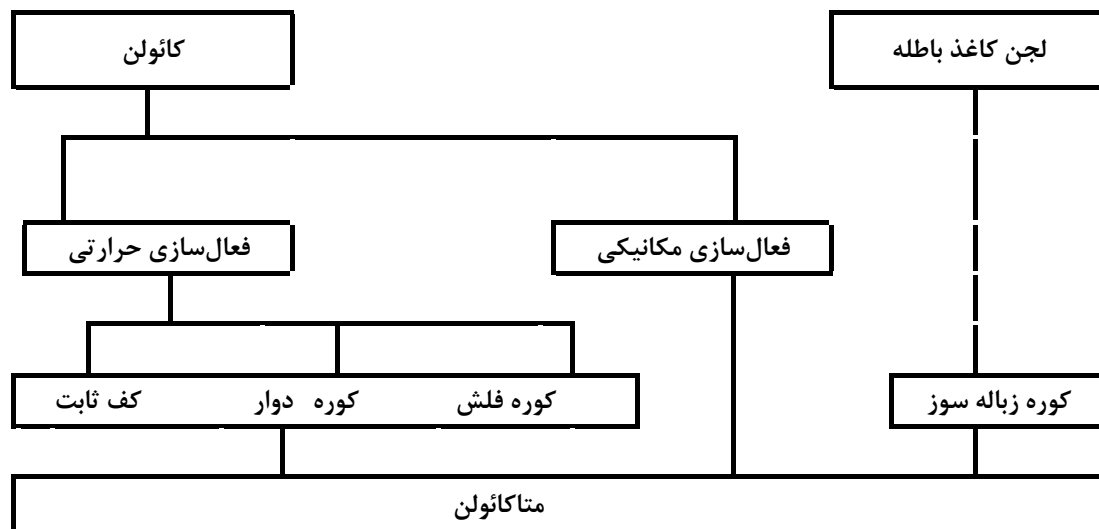


شکل ۱- طرح کلی ساختار کائولینیت [۱۶]



شکل ۲- تصویر SEM یک نوع کائولن [۱۷]

شکل ۳ روش‌های مختلف تولید متاکائولن را نشان می‌دهد. فعال‌سازی حرارتی کائولن، فعال‌سازی مکانیکی کائولن و کلسیناسیون لجن کاغذ باطله در کوره زباله سوز از روش‌های تولید متاکائولن هستند. معمولاً در مقیاس صنعتی، از فرآیندهای فعال‌سازی حرارتی استفاده می‌شود. در فعال‌سازی حرارتی از خاک رس به عنوان ماده خام ورودی برای تولید متاکائولن استفاده می‌شود.

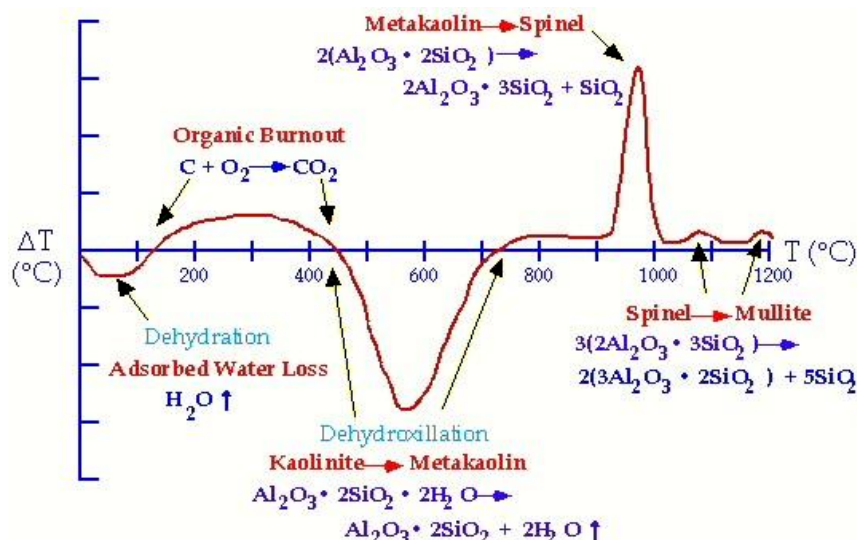


شکل ۳- روش‌های مختلف تولید متاکائولن [۱۸]

خاک رس کائولنی به صورت سنتی برای قرن‌ها در سرامیک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین این ماده به عنوان پرکننده و مات‌کننده در صنعت کاغذسازی و در صنایع دیگرگداز، لاستیک‌سازی، رنگ، پلاستیک، صنایع شیمیایی و داروسازی استفاده می‌شود. کاربرد این ماده در صنعت ساخت و ساز نسبتاً جدید است.

۸- فعال‌سازی حرارتی کائولن

متاکائولن به مقدار زیادی از طریق فعال‌سازی حرارتی کائولن ساخته می‌شود که این فعال‌سازی حرارتی به کلسیناسیون یا هیدروکسیل‌زدایی کائولینیت که جزء اصلی تشکیل دهنده کائولن است اطلاق می‌گردد و در یک فرایند تحت شرایط کنترل شده انجام می‌شود. فرایند گرمایش کائولن به صورت آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA) در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۹].



شکل ۴- آنالیز حرارتی دیفرانسیلی کائولن (DTA)

تغییرات فیزیکی شیمیایی که در حین عملیات حرارتی کائولن رخ می‌دهد در جدول ۳ ارایه شده است. تحت شرایط محیطی، کائولن پایدار است. اما همان‌طور که در شکل ۴ و جدول ۳ نشان داده شده است وقتی کائولینیت در دماهای بالای ۴۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده می‌شود، کلسینه شده و بیشترین کاهش جرم (حدود ۱۴ درصد) را در یون‌های هیدروکسیل با پیوند شیمیایی دارد.

جدول ۳- تغییرات فیزیکی شیمیایی کائولن در حین عملیات حرارتی

تغییرات فیزیکی شیمیایی	دما، درجه سلسیوس	
آب‌زدایی، خروج آب‌های جذب شده در خلل و فرج، سطح و غیره	< ۱۰۰	۱
کاهش وزن ناشی از خروج آب و سوختن مواد ارگانیک، آرایش مجدد لایه‌های اکتاهدرال در ساختار کائولینیت	۱۰۰-۴۵۰	۲
هیدروکسیل‌زدایی و فعال‌سازی، تبدیل کائولن به متاکائولن و واکنش‌پذیر $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O \uparrow$	> ۴۵۰	۳
کریستاله شدن مجدد: تبدیل متاکائولن به مواد سرامیکی بی اثر مثل سیلیکا، اسپینل ($2Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$) و مولایت ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	> ۹۵۰	۴

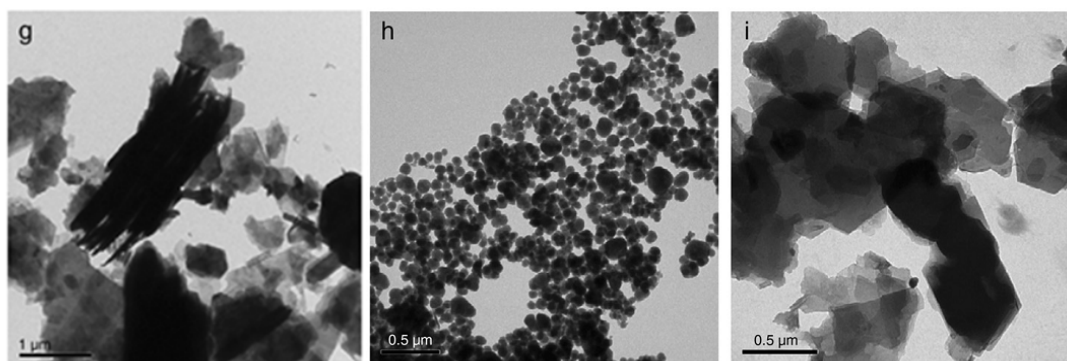
عملیات حرارتی، فعال‌سازی حرارتی یا تکلیس، ساختار کائولینیت را به گونه‌ای می‌شکند که لایه‌های آلومینا و سیلیکا جمع می‌شوند و نظم دور بردشان را از دست می‌دهند. نتیجه هیدروکسیل‌زدایی و بی‌نظمی، متاکائولن است که یک فاز انتقالی به شدت فعال شده، ماده‌ای آمورف با واکنش‌پذیری پوزولانی و هیدرولیکی نهان که برای مصرف به عنوان یک افزودنی در سیمان و بتن بسیار مناسب می‌باشد [۲۰]. تولید متاکائولن با کیفیت بالا، رسیدن به یک هیدروکسیل‌زدایی تقریباً کامل بدون گرمایش بیش از حد است. عملیات حرارتی بیش از اندازه منجر به کریستاله شدن مجدد و تشکیل مواد سرامیکی غیر واکنش‌پذیر می‌گردد. دمای فعال‌سازی حرارتی باید در محدوده بین پیک گرم‌گیر هیدروکسیل‌زدایی کائولن و پیک گرم‌زای کریستاله شدن مجدد آن باشد. این محدوده دمایی می‌تواند با استفاده از دستگاه آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA) تعیین شود [۲۱]. چون پارامترهای فرآیند مختلف هستند، دمای واقعی بستگی به نوع ماده اولیه و روش تکلیس دارد. دمای تکلیس کائولن به متاکائولن از نظر محققین مختلف متفاوت است. با این وجود Morat و Comel [۲۲] گزارش کردند دماهایی که در محدوده ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس باشند بهترین عملکرد فعال‌سازی حرارتی را می‌دهند و دماهای بیشتر از ۸۵۰ درجه سلسیوس باعث کریستاله شدن و به دنبال آن کاهش در واکنش‌پذیری و خاصیت پوزولانی متاکائولن می‌شوند.

ایجاد خواص پوزولانی در کائولن کلسینه شده اساساً بستگی به ماهیت و میزان کاتولینیت در ماده خام، شرایط کلسیناسیون و ریز بودن ذرات محصول نهایی دارد. ویژگی‌های معدنی کائولن اولیه، اندازه دانه طبیعت ناخالصی‌ها و به خصوص حالت کریستاله شدن نیز در خواص پوزولانی اثر دارند [۲۳]. همچنین گزارش شده کائولنی که میزان بلورینگی کمتری دارد (دارای بی‌نظمی بیشتری باشد) به راحتی آب‌زدایی می‌شود، یعنی زمان کمتری برای هیدروکسیل‌زدایی در یک دمای معین دارد [۲۴]. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، فعال‌سازی حرارتی کائولن از چهار فرآیند: کوره کف ثابت، کوره دوار، بستر سیال و تکلیس تابش آبی (فلش) تشکیل می‌شود. کوره کف ثابت به زمان طولانی‌تری برای کلسیناسیون نیاز دارد و در کوره دوار زمان تکلیس نسبت به کوره کف ثابت کاهش می‌یابد. در فرآیند بستر سیال، زمان کلسیناسیون به چند دقیقه کاهش می‌یابد. با استفاده از فرآیند کلسیناسیون تابش آبی روی کائولن خامی که به خوبی خرد شده، زمان تکلیس به چند ثانیه کاهش می‌یابد. این فرآیند شامل گرمایش خیلی سریع، کلسیناسیون و سرد نمودن مواد پودری معلق در یک محیط گازی است [۲۵]. متاکائولن قبل از این که به عنوان افزودنی استفاده شود نیاز به خردایش دارد تا به ریزی مطلوب و موردنظر برسد. در صورتی که خردایش بعد از عملیات حرارتی انجام شود، انرژی که برای این فرآیند لازم است بیش از مقدار انرژی لازم برای خردایش کائولن خام است. کاهش زمان و افزایش سرعت کلسیناسیون واکنش‌پذیری پوزولانی متاکائولن را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

[۲۶ Salvador] دریافت که کائولنی که به صورت تابش آبی کلسینه شده، واکنش‌پذیری اولیه بالاتری دارد و در مقایسه با کائولنی که در کوره کف ثابت تحت عملیات حرارتی قرار گرفته، استحکام فشاری بهتری ایجاد می‌کند. محققان [۲۷] پیشنهاد کردند که حتی با هیدروکسیل‌زدایی جزئی کاتولینیت که همراه با ۵۵ درصد آمورف‌سازی است، این ماده می‌تواند به عنوان یک افزودنی پوزولانی فعال در نظر گرفته شود. یافته‌ها به سمت امکان‌پذیری کاهش مصرف انرژی در ساخت متاکائولن در مقیاس بزرگ از راه عملیات حرارتی هدایت می‌شوند. این کار نشان دهنده نیاز به تحقیق بیشتر در این حوزه است. دی‌اکسید کربن (CO_2) منتشر شده از تولید متاکائولن از راه عملیات حرارتی کائولن، در مقایسه با دی‌اکسید کربنی که طی تولید سیمان منتشر می‌شود خیلی کمتر است. برآورد شده یک تن متاکائولن تولید شده، بواسطه فرآیندهای مختلفی چون استخراج مواد خام، عملیات حرارتی در کوره و غیره، حدود ۱۷۵ کیلوگرم گاز CO_2 در اتمسفر آزاد می‌کند [۲۸].

۹- فعال سازی مکانیکی کائولن

کائولن همچنین می‌تواند با استفاده از عملیات مکانوشیمیایی یا فعال‌سازی مکانیکی، به کائولن آمورف یا متاکائولن تبدیل شود. تا به حال استفاده از این فرآیند در مقیاس بزرگ گزارش نشده است. این فرآیند شامل عمل خردایش که سبب ایجاد تغییرات در ساختار کریستالی مواد خرد شده همراه با کاهش اندازه ذرات می‌باشد. این عملیات علاوه بر نواحی سطحی و تغییراتی که در رفتار فیزیکی شیمیایی مواد ایجاد می‌کند باعث بوجود آمدن سایت‌های سطحی فعال نیز می‌گردد [۲۹]. زمانی که عمل کاهش اندازه ذرات در دستگاهی که در آن از نیروهای ضربه‌ای و سایشی بین ذرات استفاده می‌شود- مانند آنچه در آسیاب‌های لرزشی، نوسانی یا سیاره‌ای وجود دارد- اثر فعال‌سازی مکانیکی مشاهده می‌شود. انرژی منتقل شده بواسطه عمل خردایش برای تغییر شکل و یا شکستن کریستال‌ها به کار می‌رود [۳۰، ۳۱]. آسیابکاری به شدت شکل ذرات را به لبه‌های گرد تغییر می‌دهد این در حالی است که عملیات حرارتی تأثیری روی مورفولوژی ذرات نمی‌گذارد [۳۲]. شکل ۵ مورفولوژی کائولن طبیعی و آن‌هایی که مورد عملیات مکانوشیمیایی و حرارتی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. زمان مورد نیاز برای آمورف‌سازی کامل در آسیاب بستگی به ترکیب شیمیایی کائولن طبیعی دارد. فعالیت پوزولانی محصول بستگی به ترکیب مینرالی کائولن و زمان خردایش آن دارد. مشخص شده که ذرات کوارتز موجود در کائولن به دلیل سختی آنها به فرآیند خردایش و فعال‌سازی مکانیکی کمک می‌کند [۳۳].



شکل ۵- ریزنگاره‌های TEM (g) کائولن طبیعی (h) کائولن ۱۲۰ دقیقه آسیاکاری شده (i) کائولن کلسینه شده در ۷۰۰ درجه سلسیوس [۳۲]

در گذشته نیز اثر فعال‌سازی مکانیکی به منظور بهبود فعالیت پوزولانی یا فعالیت سیمانی افزودنی‌های مینرالی مورد استفاده قرار گرفته است و از آنجا که این فرآیند شامل هیچ احتراق یا عمل سوختن نیست، این انتظار وجود دارد که تولید گاز گلخانه‌ای در مقایسه با آنچه در فرآیند فعال‌سازی حرارتی وجود دارد، کاهش یابد. در این حوزه به کارهای بیشتری نیاز می‌باشد.

مراجع

- [1] B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research* 41, 2011.
- [2] M.S. Mansour, El-HadjKadri, S. Kenai, M. Ghrici, R. Bennaceur, Influence of calcined kaolin on mortar properties, *Construction and Building Materials* 25, 2011.
- [3] S. Mindess, F. Young, D. Darwin, *Concrete*, 2nd ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.
- [4] B. B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement & Concrete Composites* 23, 2001.
- [5] A.A. Mitrović, Pozzolan obtained by mechanochemical treatment of kaolinite clay, *American Institute of Physics conf. proc.* 82, 2011.
- [6] M. Saad, W. de Andrade, V. Paulon. Properties of mass concrete containing an activate pozzolan made from clay. *Concrete International*. 4, 1982.
- [7] R. San Nicolas, M. Cyr, G. Escadeillas, Characteristics and applications of flash metakaolins, *Applied Clay Science* 83–84, 2013.
- [8] R. Siddique, J. Klaus, Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Applied Clay Science* 43, 2009.
- [9] E. Gamiz, M. Melgosa, M. Sanchez, J. Martin, M. Delgado, Relationships between chemico-mineralogical composition and color properties on selected natural and calcined Spanish kaolins, *Applied Clay Science* 28, 2005.
- [10] C. He, B. Osbaeck, E. Makovicky, Pozzolan reaction of six principal clay minerals: activation reactivity assessments and technological effects, *Cement Concrete. Research*, 25, 1995.
- [11] M.Zhang, V. Malhotra, Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete, *Cement. Concrete Research*, 25, 1995.
- [12] E. Badogiannis, G. Kakali, G. Dimopoulou, E. Chaniotakis, S. Tsvilis, Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins, *Cement Concrete Composition*, 27, 2005.
- [13] G. W. Brinkley, *Ceramic fabrication processes*, Cambridge & New York: Technology Press & John Wiley and Sons
- [14] W.D. Kingery, D.R Uhlmann, H.K. Bowen, *Introduction to ceramics*. 2nd ed., John Wiley and Sons. New York, 1976.
- [15] B. Philippe, N. J. Claude, *Ceramic materials, processes, properties and applications*, ISTE Ltd, 2007.
- [16] C. Bulent, C. Cagn, T. Ahmet, A. Beytullah, E. Erdal, Covalent grafting of pyridine -2- methanol into kaolinite layers, *J. Mol. Structure*, 1032, 2003.
- [17] H. Murrar Haydn. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. *Applied Clay Science*, 17, 2000.
- [18] J. D. Bapat, *Mineral admixtures in cement and concrete*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [19] DTA and TGA of kaolin and ball clay, <http://cems.alfred.edu/courseces101/firing/tchtml>, 2004.
- [20] J. Bensted, P. Barnes, *Structure and Performance of Cements*, 2nd edn., Spon Press, New York, 2002.
- [21] J. Ambroise, M. Murat, J. Pera., Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. V: Extension of the research and general conclusions, *Cement and Concrete Research*, 15, 1985.
- [22] M. Murat, C. Comel, Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: III. Influence of calcinations process of kaolinite on mechanical strength of hardened metakaolinite. *Cement and*

- Concrete Research, 13, 1983.
- [23] G. Kakali, T. Perraki, S. Tsvilis, E. Badogiannis, Thermal treatment of kaolin: The effect of mineralogy on the pozzolanic activity, Applied Clay Science, 20, 2001.
- [24] C. Bich, J. Ambroise, J. Pera, Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin, Applied Clay Science, 44, 2009.
- [25] S. Salvador, Pozzolanic properties of flash-calcined kaolinite: A comparative study with soak-calcined products, Cement and Concrete Research, 25, 1995.
- [26] A. Shvarzman, K. Kovler, G. Grader, G. Shter, The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, Cement and Concrete Research, 33, 2003.
- [27] F. Cassagnabere, G. Escadeillas, M. Mouret, Study of the reactivity of cement/metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete, Construction and Building Materials, 23, 2009.
- [28] M. Miyazaki, M. Kamitani, T. Nagai, J. Kano, F. Saito, Amorphization of kaolinite and media motion in grinding by a double rotating cylinders mill—A comparison with a tumbling ball mill, Advance Powder Technology, 11, 2000.
- [29] E. Aglietti, J. Porto Lopez, E. Pereira, Mechanochemical effects in kaolinite grinding. I. Textural and physicochemical aspects, Int. J. Mineral Process., 16, 1986.
- [30] E. Aglietti, J. Porto Lopez, E. Pereira, Mechanochemical effects in kaolinite grinding. II. Structural aspects, Int. J. Mineral Process., 16, 1986.
- [31] C. Vizcayno, R. Gutierrez, R. Castello, E. Rodriguez, C. Guerrero, Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal treatments of kaolin, Applied Clay Science, 49, 2009.
- [32] E. Mako, R. Frost, J. Kristog, E. Horvath, The effect of quartz content on the mechanochemical activation of kaolinite, J. Colloid Interface Science, 244, 2001.
- [33] Z. Sekulic, M. Petrov, D. Zivanovic, Mechanical activation of various cements, Int. J. Mineral Process., 74, 2004.

تازه‌های نشر

آشنایی با روش‌های سنتز و خواص فیزیکی نانو کامپوزیت‌های سرامیکی خودتمیزشونده

مؤلف: سامیار اسفندیاری

مهندسی مواد به‌عنوان یکی از شاخه‌های اصلی، همواره در حال رشد و شکوفایی بوده است و این تغییرات، تاثیرات چشمگیری را در تمامی زمینه‌های صنعتی برجای گذاشته است. کامپوزیت‌ها به‌عنوان مواد تلفیقی برای بهبود خواصی از جمله خواص فیزیکی، الکتریکی، مکانیکی درجه تازه‌ای را برای محققان و مهندسان صنعت باز کرده‌اند.

کتاب پیش رو مقدمه‌ای بر نانو کامپوزیت‌های پایه سرامیکی می‌باشد که به بررسی خواص خودتمیزشوندگی آن‌ها پرداخته شده است. در این جا دی اکسیدتیتانیم که به عنوان یک سرامیک خودتمیزشوندگی شناخته شده است با سرامیکی دیگر ترکیب شده و خواص خودتمیزشوندگی و فتوکاتالیستی آن‌ها به عنوان یک نانو کامپوزیت پایه سرامیکی مورد بررسی قرار گرفت تا مشخص شود خودتمیزشوندگی در دیگر کامپوزیت‌های سرامیکی چگونه می‌باشد.

مطالب این کتاب شامل شش فصل می‌باشد که به بررسی ریزساختار، خواص فیزیکی، الکتریکی و روش‌های تولید کامپوزیت‌های خودتمیزشونده که زمینه علمی و کاربردی

آن در جهان امروز بسیار جدید و مفید می‌باشد تقسیم شده است.



معرفی پایان‌نامه‌های دانشجویی

پایان‌نامه دکتر

بررسی اثر افزودن عناصر زیرکونیوم و کروم بر رفتار تبلور و هدایت یونی شیشه-سرامیک‌های سیستم $\text{Li}_2\text{O-TiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$



دانشجو: پرینا گوهریان

اساتید راهنما: بیژن افتخاری یکتا، علیرضا آقایی

استاد مشاور: سارا بنی جمالی

چکیده: هدف از انجام این پژوهش، بررسی رفتار هدایت یونی شیشه-سرامیک‌های $\text{Li}_2\text{O-TiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ می‌باشد. در این راستا، ابتدا با توجه به این موضوع که با انتخاب ترکیب استوکیومتری احتمال تبلور فازهای نامطلوب کم می‌باشد ترکیب استوکیومتری در نظر گرفته شد. سپس با توجه به رفتار شیشه‌سازی نامطلوب آن، به‌منظور بهبود رفتار شیشه‌سازی به این ترکیب مقادیر مختلف SiO_2 افزوده شد.

پس از بهینه‌سازی رفتار شیشه‌سازی، شیشه ۱۰۰ قسمت $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$ و ۵ قسمت SiO_2 به‌عنوان شیشه پایه انتخاب شد. شیشه پایه پس از عملیات حرارتی در دمای پیک تبلور (700°C) به مدت ۲ ساعت، دارای فاز $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$ به‌عنوان فاز بلورین اصلی و فاز TiO_2 به‌عنوان فاز بلورین فرعی بود.

در ادامه تأثیر دمای عملیات حرارتی بر فازهای بلورین متبلور شده، ریزساختار، رفتار هدایت الکتریکی و انرژی اکتیواسیون هدایت الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفت. افزایش دمای عملیات حرارتی از دمای 700°C به 950°C ، کاهش انرژی اکتیواسیون هدایت از مقدار $27/91$ به $21/21$ KJ/mol و افزایش هدایت الکتریکی از مقدار 3×10^{-5} به $7 \times 10^{-6} \text{ Scm}^{-1}$ را در پی داشت. با افزایش بیشتر دمای عملیات حرارتی به دمای 1000°C مقاومت الکتریکی افزایش یافت.

سپس عنصر دوپ شونده Cr به ترکیب شیشه پایه افزوده شد و تأثیر افزودن این عنصر بر رفتار تبلور، فازهای بلورین متبلور شده، ریزساختار، پارامترهای شبکه، رفتار هدایت الکتریکی و انرژی اکتیواسیون هدایت ترکیب ۱۰۰ قسمت $\text{Li}_{1+x}\text{Cr}_x\text{Ti}_2(\text{PO}_4)_3$ و ۵ قسمت SiO_2 ($x=0.2-0.8$) مورد ارزیابی قرار گرفت.

با وجود افزودنی اکسید کروم بیشترین مقدار هدایت دمای اتاق با مقدار $2/14 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ و کمترین مقدار انرژی اکتیواسیون هدایت با مقدار $15/1$ KJ/mol به ازای $x=0/5$ حاصل شد. بنابراین، شیشه-سرامیک ۱۰۰ قسمت $\text{Li}_{1.5}\text{Cr}_{0.5}\text{Ti}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ و ۵ قسمت SiO_2 به‌عنوان ترکیب حاوی مقدار بهینه اکسید کروم انتخاب شد.

سپس اثر عملیات حرارتی بر فازهای بلورین متبلور شده، ریزساختار، هدایت الکتریکی و انرژی اکتیواسیون هدایت مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین مقدار هدایت دمای اتاق با مقدار $35/31 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ و کمترین مقدار انرژی اکتیواسیون هدایت با مقدار $9/1 \text{ KJ/mol}$ برای نمونه‌ای که در دمای 780°C به مدت ۲ ساعت تحت عملیات حرارتی قرار گرفته بود، حاصل شد.

در مرحله بعد افزودنی اکسید زیرکونیوم به ترکیب شیشه پایه اضافه شد و اثر افزودن این عنصر بر رفتار تبلور، فازهای بلورین متبلور شده، ریزساختار، پارامترهای شبکه a و c ، رفتار هدایت الکتریکی و انرژی اکتیواسیون هدایت مورد ارزیابی قرار گرفت. با افزودن اکسید زیرکونیوم، هدایت الکتریکی از مقدار 3×10^{-5} به $7/8 \times 10^{-6} \text{ Scm}^{-1}$ کاهش و انرژی اکتیواسیون هدایت از مقدار $27/91$ به $25/14 \text{ KJ/mol}$ افزایش یافت.

کلمات کلیدی: شیشه-سرامیک، هدایت یونی، طیف سنجی امپدانس، تبلور

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تاثیر افزودنی کاربید بور (B_4C) بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی پریفرم متخلخل کاربید سیلیسیم (SiC) رخنه‌دهی شده با مذاب سیلیسیم



دانشجو: مصطفی پرهیزکار

اساتید راهنما: حمید رضا بهاروندی، امید میرزایی

چکیده: کامپوزیت‌های پیوندی واکنشی کاربید سیلیسیم ($RBSC$) از طریق رخنه‌دهی سیلیسیم مذاب درون پریفرمی از کاربید سیلیسیم و کربن تولید می‌گردند. مزیت اصلی تولید کامپوزیت‌های $RBSC$ به این روش پایین بودن دمای کاری (حدود $1500^\circ C$) در مقایسه با روش‌های زینتر بدون فشار یا پرس گرم می‌باشد. در تحقیق حاضر تأثیر افزودنی کاربید بور (B_4C) بر ریزساختار و خواص مکانیکی سرامیک‌های $RBSC$ به وسیله طراحی آزمایش به روش تاگوچی بررسی شد. مواد اولیه مورد استفاده، پودر SiC در چهار اندازه مختلف (۵، ۱۵، ۶۵ و ۱۱۴ میکرون)، افزودنی‌های B_4C با اندازه $2/5\mu m$ و کربن اکتیو به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی و پودر رزین فنولیک به عنوان بایندر و عامل ایجاد تخلخل به میزان ۵٪ وزنی می‌باشند. پریفرم‌های تهیه شده از ترکیب‌های فوق، تحت فشار ثابت $75MPa$ پرس شده و جهت عملیات پیرولیز، با سرعت گرمایش $3^\circ C/min$ در دمای $600^\circ C$ حرارت‌دهی شدند. سپس جهت عملیات رخنه‌دهی با مذاب سیلیسیم در کوره خلأ، با سرعت گرمایش $10^\circ C/min$ در دماهای مختلف 1500 ، 1550 ، 1600 و 1650 درجه سانتیگراد قرار گرفتند. با افزایش کربن اکتیو، مقادیر مدول الاستیک، دانسیته، سختی و استحکام خمشی افزایش یافته اما بر روی چقرمگی بی‌تاثیر است. با افزایش در مقدار B_4C ، مدول الاستیک، سختی و استحکام خمشی افزایش پیدا کرده اما مقادیر دانسیته، و چقرمگی شکست روند کاهشی داشته‌اند. با افزایش در اندازه ذرات اولیه SiC ، مقدار استحکام خمشی کاهش یافته و مقادیر دانسیته، مدول الاستیک و سختی نمونه‌ها تا $15\mu m$ روند افزایشی داشته و سپس کاهش یافته‌اند. با افزایش دمای رخنه‌دهی تا $1600^\circ C$ ، مقادیر مدول الاستیک، دانسیته نهایی، سختی و استحکام خمشی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابند، اما از طرف دیگر، چقرمگی شکست به طور پیوسته روند افزایشی داشته است. نهایتاً ترکیب بهینه در این تحقیق، در نمونه شماره ۱۶ با دانسیته $2/02 g/cm^3$ ، مدول الاستیک $447/2GPa$ ، سختی $2360/7 kg/mm^2$ ، استحکام خمشی $378/22MPa$ و چقرمگی شکست $3/2MPa.m^{1/2}$ به دست آمده است.

کلمات کلیدی: تاگوچی، پرس، پریفرم متخلخل کاربید سیلیسیم، افزودنی کاربید بور، رخنه‌دهی و سرامیک $RBSC$.

واژه‌گزینی سرامیک با همکاری فرهنگستان زبان و ادب فارسی

واژه‌گزینی سرامیک با همکاری فرهنگستان زبان و ادب فارسی

به‌منظور بررسی واژه‌های مربوط به علم و صنعت سرامیک، کارگروه واژه‌گزینی سرامیک با حضور کارشناسان انجمن سرامیک ایران و فرهنگستان زبان فارسی تشکیل شد، که اعضای این کارگروه به شرح زیر تقسیم شدند:

۱- دکتر واهاک کاسپاری مارقوسیان - دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دکتر حسین سرپولکی - دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دکتر مهران صولتی هاشجین - دانشگاه امیرکبیر

۴- دکتر مسعود محبی - دانشگاه بین‌المللی امام خمینی

۵- دکتر محمود ربیعی - دانشگاه بابل

۶- مهندس مهران غفاری - پژوهشگاه مواد و انرژی

۷- خانم فحام زاده - فرهنگستان زبان فارسی

۸- آقای صباغی - فرهنگستان زبان فارسی

هدف از تشکیل این کارگروه تصویب واژه‌های فارسی و استفاده از این واژگان در رساله‌های دانشگاهی و مقاله‌ها بوده است. در این حوزه گروه‌های مهندسی مواد و متالورژی، مهندسی بسپار، کارگروه خوردگی، کارگروه آهن و فولاد، جوشکاری و آزمایش‌های مخرب نیز فعالیت می‌کنند.

سرانجام با تشکیل ۲۲ جلسه مشترک کارگروه واژه‌گزینی مصوبات به شورای واژه‌گزینی معرفی شد و پس از چهار جلسه پیاپی در تاریخ ۹۳/۲/۱ واژگان زیر به تصویب نهایی فرهنگستان رسیده است.

انجمن سرامیک ایران وظیفه خود می‌داند در راستای رواج واژگان ارایه شده در مجله‌ها و مقاله‌ها، همایش‌ها و سمینارها اقدام کنند. به‌همین جهت از کلیه متخصصان، دانشجویان، استادان و کارشناسان علم و صنعت سرامیک ایران دعوت می‌شود در کاربرد و رواج واژگان سرامیک همکاری کنند.

لازم به اشاره است که فایل pdf واژگان در سایت انجمن سرامیک ایران قابل دانلود است.

لغات مصوب:

واژه بیگانه	معادل پیشنهادی	ردیف	
ceramic	سرامیک	۱	-۱
advanced ceramic	سرامیک پیشرفته	۱-۱	-۲
engineering ceramic	سرامیک مهندسی	۱-۲	-۳
magnetic ceramic	مغناطیسرامیک	۱-۳	-۴
structural ceramic	سرامیک سازه‌ای	۱-۴	-۵
ceramic whiteware	سپیدافزار سرامیکی	۲	-۶
fine ceramic	سرامیک ظریف	۳	-۷
ceramic process	فرایند ساخت سرامیک	۴	-۸

ceramics	سرامیک‌شناسی	۵	-۹
electroceramic	الکتروسرامیک	۶	-۱۰
optical ceramic	سرامیک اپتیکی	۷	-۱۱
china clay syn. kaolin	خاک چینی مت. کائولن	۸	-۱۲
fireclay syn. fireclay refractory	رُس دیرگداز	۹	-۱۳
ball clay	سیاه‌رُس	۱۰	-۱۴
whiteware	سپیدافزار، سپیدینه	۱۱	-۱۵
alumina whiteware	سپیدینه آلومینی	۱۱-۱	-۱۶
stoneware	سنگینه*، داشخال	۱۳	-۱۷
chemical stoneware	سنگینه شیمیایی / داشخال شیمیایی	۱۳-۱	-۱۸
earthenware	رُسینه	۱۴	-۱۹
sanitary earthenware	رُسینه بهداشتی	۱۴-۱	-۲۰
vitreous china	چینی شیشه‌ای، چینی زجاجی	۱۶	-۲۱
vitreous china sanitaryware	چینی شیشه‌ای بهداشتی، چینی زجاجی بهداشتی	۱۶-۱	-۲۲
slip	دوغاب	۱۷	-۲۳
slip casting	ریخته‌گری دوغابی	۱۷-۱	-۲۴
drain casting	ریخته‌گری توخالی	۱۸	-۲۵
solid casting	ریخته‌گری توپُر	۱۹	-۲۶
pressure casting	ریخته‌گری فشاری	۲۰	-۲۷
centrifugal casting	ریخته‌گری مرکزگریز	۲۱	-۲۸
plastic forming	شکل‌دهی موم‌سان	۲۲	-۲۹
deflocculation	لخته‌زدایی، روان‌سازی	۲۳	-۳۰
deflocculant	لخته‌زدا، روان‌ساز	۲۳-۱	-۳۱
glaze	لعاب	۲۴	-۳۲
glazing	لعاب‌دهی	۲۴-۱	-۳۳
mat glaze	لعاب مات	۲۴-۲	-۳۴
opaque glaze	لعاب کدر	۲۴-۳	-۳۵
raw glaze	لعاب خام	۲۴-۴	-۳۶
glaze firing	پخت لعاب	۲۴-۵	-۳۷
crackle glaze	لعاب ترک	۲۴-۶	-۳۸
on-glaze decoration	تزیین رولعابی	۲۵	-۳۹
in-glaze decoration	تزیین تولعابی	۲۶	-۴۰

underglaze decoration	تزئین زیرلعابی	۲۷	-۴۱
enamel	لعاب، لعاب‌فلز	۲۸	-۴۲
glass enamel	مینای شیشه	۲۸-۱	-۴۳
enamel firing	پخت تزئین	۲۸-۲	-۴۴
frit ¹	فریت	۲۹	-۴۵
frit ²	فریت‌سازی	۳۰	-۴۶
fritted glaze	لعاب فریت‌شده	۳۱	-۴۷
biscuit	بیسکویت	۳۲	-۴۸
biscuit firing	پخت بیسکویت	۳۲-۱	-۴۹
furnace	کوره	۳۳	-۵۰
annealing furnace	کوره تاب‌کاری	۳۳-۱	-۵۱
electric furnace	کوره برقی	۳۳-۲	-۵۲
glass furnace	کوره شیشه	۳۳-۳	-۵۳
tank furnace	کوره محفظه‌ای	۳۳-۴	-۵۴
box furnace	کوره اتاقکی	۳۳-۵	-۵۵
kiln	کوره پخت، پزاوه	۳۴	-۵۶
kiln furniture	پخت‌اسباب	۳۴-۱	-۵۷
sagger (sagger)	جعبه کوره	۳۵	-۵۸
sagger clay	رس جعبه کوره	۳۵-۱	-۵۹
refractory	دیرگداز	۳۶	-۶۰
refractoriness	دیرگدازی	۳۶-۱	-۶۱
refractory cement	سیمان دیرگداز، سیمان نسوز	۳۶-۲	-۶۲
refractory concrete	بتن دیرگداز، بتن نسوز	۳۶-۳	-۶۳
refractory ceramic	سرامیک دیرگداز	۳۶-۴	-۶۴
refractory oxide	اکسید دیرگداز	۳۶-۵	-۶۵
refractory sand	ماسه دیرگداز	۳۶-۶	-۶۶
refractory lining	آستری دیرگداز، جداره دیرگداز	۳۶-۷	-۶۷
refractory coating	پوشش دیرگداز	۳۶-۸	-۶۸
castable refractory	دیرگداز ریختنی	۳۶-۹	-۶۹
fused cast refractory	دیرگداز ذوبی-ریختگی	۳۶-۱۰	-۷۰
bulk volume	حجم کلی	۳۷	-۷۱
apparent volume	حجم ظاهری	۳۸	-۷۲
true volume	حجم واقعی	۳۹	-۷۳

true density	چگالی واقعی	۴۰	-۷۴
theoretical density	چگالی نظری	۴۱	-۷۵
tap density	چگالی تفه‌ای	۴۲	-۷۶
green density	چگالی خام	۴۳	-۷۷
green body	بدنه خام	۴۴	-۷۸
green strength	استحکام خام	۴۵	-۷۹
glass annealing	تاب‌کاری شیشه	۴۷	-۸۰
glass-ceramic	شیشه-سرامیک	۴۸	-۸۱
glass softening point	نقطه نرم‌شوندگی شیشه	۴۹	-۸۲
glass refining/ fining	حباب‌زدایی شیشه	۵۰	-۸۳
sheet glass	شیشه جام	۵۱	-۸۴
container glass	شیشه ظرف	۵۲	-۸۵
glass container	ظرف شیشه‌ای	۵۳	-۸۶
sodalime glass	شیشه سداهکی	۵۴	-۸۷
network former	شبکه‌ساز	۵۵	-۸۸
network modifier	دگرگون‌ساز شبکه	۵۶	-۸۹
bridging oxygen	اکسیژن پل‌زن	۵۷	-۹۰
non-bridging oxygen	اکسیژن غیرپل‌زن	۵۷-۱	-۹۱

اعضای حقوقی انجمن سرامیک ایران

اعضای حقوقی ویژه انجمن سرامیک ایران



چینی بهداشتی ارس

مدیر عامل: مهندس حسین پور

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان

ملاصدرا، خیابان شیخ بهایی، میدان شیخ

بهایی، برج صدف، طبقه ۴، واحد ۶۴

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۶۰۶۵۰۸

نشانی سایت: www.arasind.com



تهپیه و تولید مواد نسوز کشور

مدیر عامل: مهندس باقری

آدرس دفتر مرکزی: تهران، یوسف‌آباد،

خیابان ابن سینا، نیش خیابان ۳۱،

شماره ۸۲

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۱۲۵۶۲

نشانی سایت: www.irrep.com



کاشی نیلو

مدیر عامل: مهندس باطنی

آدرس دفتر مرکزی: اصفهان، خیابان

حکیم نظامی، ابتدای محترم کاشانی،

ساختمان کاشی نیلو

تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۳۱-۶۲۵۴۱۲۶

نشانی سایت: www.NilouTile.com



شرکت پویا همراه سرام (بازرگانی و مهندسی مشاور)

مدیر عامل: مهندس محسنی طارمسری

آدرس دفتر مرکزی: تهران،

تهرانپارس، خیابان رشید، نیش خیابان

۱۴۴ غربی، ساختمان امیرکبیر، طبقه ۲،

واحد ۱۰

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۷۷۲۹۵۴۹۸

نشانی سایت: www.phceram.com

اعضای حقوقی ممتاز انجمن سرامیک ایران

تهپیه و تولید مواد اولیه آریاکانی اسپادانا

مدیر عامل: دکتر پویامهر

آدرس دفتر مرکزی: اصفهان، خیابان ملاصدرا، خیابان پانزدهم،

پلاک ۳۴، واحد ۳

تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱۱-۶۶۱۷۵۳۷-۸



پارس اپال

مدیر عامل: مهندس احمد دهقان

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان

آرژانتین، خیابان احمد قصیر، کوچه چهاردهم

غربی، پلاک ۲۶، طبقه سوم

تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۵۱۵۰۱۵

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

مدیریت: دکتر متین

آدرس: دزفول، کوی آزادگان، دانشگاه آزاد اسلامی

تلفن: ۰۶۱۳۴۴۵۷۱۷۴

نشانی سایت: www.iaud.ac.ir

چینی بهداشتی آرمیتاژ

مدیر عامل: مهندس محمدحسین وکیلی مقدم

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان ونک، خیابان ونک، پاساژ تک،

طبقه دوم، آپارتمان شماره ۷

تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۷۹۰۲۲۷



دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

مدیریت: دکتر متین

آدرس: دزفول، کوی آزادگان، دانشگاه آزاد اسلامی

تلفن دفتر مرکزی: ۰۶۱۳۴۴۵۷۱۷۴

نشانی سایت: www.iaud.ac.ir**دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان**

مدیریت: دکتر لک

آدرس: اهواز، سهراه فرودگاه، دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات

تلفن دفتر مرکزی: ۰۶۱۳۴۴۵۷۱۷۴

نشانی سایت: www.khouzestan.srbiau.ac.ir**شایراد تجارت پارس**

مدیرعامل: محمد رضا آجرلو

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان آفریقا، خیابان فرزنان غربی،

پلاک ۸۰، واحد ۱۱

تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۶۴۸۳۱۰

نشانی سایت: www.shyrad.com**فرآورده‌های نسوز آذر**

مدیرعامل: مهندس حسن زاده

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ولیعصر، بالاتر از پارک ساعی،

کوچه ساعی ۲، روبروی مدرسه پسرانه

هاتف، پلاک ۳۱، واحد منفی ۱

تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۸۸۲۰۹۵

نشانی سایت:

www.azarref.ir**کاشی کسری**

مدیرعامل: مهندس روشنفکر

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان آفریقا، خیابان ناهید شرقی،

پلاک ۱۲، طبقه ۳ و ۵

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۲۰۱۰۱۴۰

نشانی سایت: www.kasratileco.com**کاشی گرانیث و کاشی لعاب زهره**

مدیرعامل: مهندس خیاط

آدرس دفتر مرکزی: خراسان رضوی، کاشمر، کیلومتر ۱۲ محور

کاشمر به مشهد، جنب

شهرک صنعتی، شرکت کاشی

زهره کاشمر

تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۵۵۳۸۳۵۹۱

نشانی سایت: www.zohretilco.com**گروه پژوهشی سرامیک- پژوهشکده مواد- پژوهشگاه****علوم و فنون هسته‌ای**

مدیرعامل: دکتر نوزاد

آدرس دفتر مرکزی: اصفهان، ۱۵ کیلومتری جنوب شرقی، منطقه

هسته‌ای پژوهشکده مواد

تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱۳-۸۹۱۲۰۸۲

نشانی سایت: www.aeoi.org.ir**اعضای حقوقی انجمن سرامیک ایران****آپادانا سرام**

مدیرعامل: دکتر شیرالی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان

ملاصدرا، روبروی بیمارستان بقیه‌الله،

کوچه گل‌دشت، گل‌دشت یکم، پلاک ۸

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۴۳۱۰۰۰۰

نشانی سایت: www.apadanaceram.com**آریا تهران سرام**

مدیرعامل: محمد علی سلیمانی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا، خیابان شیرازی

جنوبی، خیابان اتحاد، پلاک ۴، واحد ۱

تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۰۵۹۶۱۰

اشکان پارت آفرین

مدیر عامل: مهندس غفاری

آدرس دفتر مرکزی: کرج، گلشهر ویلا رودکی

غربی، پلاک ۲۷۱

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۶۳-۶۶۷۰۸۳۶

ایران ایمدی

مدیر عامل: مهندس مطلب لو

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان شیراز شمالی، نیش کوچه

شهریار، ساختمان ۳۳، واحد ۱۲

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۰۴۷۰۷۱

نشانی سایت: www.imdco.net

**پارس کائولن**

مدیر عامل: مهندس صمدی

آدرس: طبس، نرسیده به جو خواه، معدن کائولن پارس

تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۷۵۵۷۳

نشانی سایت: www.parskaolin.com

پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ

مدیریت: دکتر پورمهیدیان

آدرس دفتر مرکزی: بزرگراه

صیاد شیرازی شمالی، خروجی لویزان، میدان حسین آباد، خیابان

وفامنش، نیش کوچه شمس، پلاک ۵۹

تلفن: ۰۲۱-۲۲۹۴۴۱۸۴

نشانی سایت: www.icrc.ac.ir

**پژوهشگاه مواد و انرژی**

مدیریت: دکتر هادوی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان آرژانتین،

انتهای خیابان الوند، کوچه جوبین، پلاک ۱۶

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۷۱۶۲۶

نشانی سایت: www.merc.ac.ir

پژوهشگاه
مواد و انرژی**پیشرو ذوب اتور**

مدیر عامل: مهندس ملایی داریانی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان احمد

قصیر، کوچه یکم، پلاک ۶ واحد ۱۰

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۵۴۹۸۸۴

نشانی سایت: www.pishrozob.com

**پیشگامان سرامیک برسام**

مدیر عامل: مهندس سرجهانی

آدرس دفتر مرکزی: شیراز، بلوار امیر کبیر برج صنعت

ورودی ۳، طبقه ۴، واحد ۴۱۷

تلفن دفتر مرکزی: ۰۷۱۳۸۳۸۵۴۴۴

نشانی سایت: www.barsamceram.com



شرکت پیشگامان سرامیک

ترمه سرامیک

مدیر عامل: مهندس سلطانی

آدرس دفتر مرکزی: تهران،

خیابان ونک، خیابان آفتاب، برج آفتاب، طبقه اول اداری، واحد ۱

تلفن: ۰۲۱-۸۸۶۱۳۹۳۹

نشانی سایت: www.termo.ir

**تولیدی و صنعتی سامان کاشی**

مدیر عامل: مهندس سیدمحسنی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، بلوار میرداماد،

بین نفت و مدرس، شماره ۲۳۷، طبقه ۱

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۲۲۵۸۸۲۱

نشانی سایت: www.samantile.com

سامان کاشی
SAMAN TILE**تولیدی و مهندسی نسوزین**

مدیر عامل: مهندس زرعیان

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان

آرژانتین، خیابان بیهقی، خیابان دوازدهم

شرقی، پلاک ۲، طبقه ۳، شماره ۶

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۵۰۴۵۹۱

نشانی سایت: www.nasoozin.com



تولیدی و مهندسی نسوزین

تهیه و تولید خاک نسوز استقلال آباده

مدیر عامل: مهندس صفری

آدرس دفتر مرکزی: آباده، چهارراه جوادیه

تلفن دفتر مرکزی: ۰۷۱۴۴۳۳۷۹۹۷

چینی اصفهان

مدیر عامل: مهندس جهانبانی

آدرس: اصفهان، جاده دولت آباد، خیابان بهارستان، اولین فرعی سمت

چپ، خیابان خوشانی

تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱۴۵۸۳۶۲۰۰



شرکت صنایع
خاک چینی ایران

خاک چینی ایران

مدیر عامل: مهندس نوروزی

آدرس دفتر مرکزی: خیابان ولیعصر، نرسیده
به پل پارک وی، کوچه خاکزاد، پلاک ۲۱، طبقه
اول

تلفن دفتر مرکزی: ۲۲۰۱۸۱۰۷



چینی زرین ایران

چینی زرین ایران

مدیر عامل: مهندس قصابی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان ونک،
خیابان ونک، ساختمان شماره ۲۵

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۷۰۰۴۴

نشانی سایت: www.zariniran.com

دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد

مدیر گروه سرامیک: دکتر میرجلیلی

آدرس: میبد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد

تلفن: ۰۳۵۲-۷۷۸۰۱۶۱-۴

نشانی سایت: www.iaumaybod.ir

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا

معاون پژوهشی: دکتر فقیهیان

آدرس: شهرضا، کیلومتر ۲ جاده بروجن

تلفن: ۰۳۲۱-۳۲۴۳۰۰۱-۵



آدرس دفتر مرکزی: یزد، شهرک صنعتی خضرآباد، بلوار افاقیا،
خیابان زیتون

تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۵۳-۷۲۷۲۴۴۸

رنگدانه‌های سرامیکی گهرفام

مدیر عامل: مهندس مهینی

درسا سرام ایستاتیس

مدیر عامل: مهندس ندافیان

آدرس دفتر مرکزی: سعادت آباد،

بلوار فرهنگ، نبش خیابان ۲۰ شرقی، پلاک ۲، طبقه ۴ شمالی

تلفن: ۰۲۱-۲۲۳۸۳۱۶۰

نشانی سایت: www.Doramic.com



سارا کاشی میبد

مدیر عامل: مهندس جعفری پور میبدی

آدرس دفتر مرکزی: میبد، شهرک صنعتی جهان آباد، بلوار نسترن،
انتهای بلوار سمت راست

تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۵۲-۷۷۷۲۲۲۸

نشانی سایت: www.saralaab.com

سارا کاشی سپاهان

مدیر عامل: مهندس مجنون

آدرس دفتر مرکزی: اصفهان، خیابان سجاد، ابتدای خیابان ارباب،
جنب بانک صادرات، مجتمع کسری، واحد ۱

تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱۳-۶۶۲۷۱۱۷

نشانی سایت: www.saratile.com

سرامیک البرز

مدیر عامل: مهندس نظیفی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا، خیابان شیراز جنوبی،
کوچه اتحاد، شماره ۱۹/۲

تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۰۵۵۸۹۰-۳

نشانی سایت: www.alborzceramic.com



ساگار و قطعات نسوز

مدیر عامل: مهندس معرفتی

آدرس: مرند، کیلومتر ۵ جاده قدیم جلفا،
شهرک صنعتی سرامیکی

تلفن: ۰۴۱۴۲۲۲۳۸۲

نشانی سایت: www.saggarmfg.com

سرامیک‌های صنعتی اردکان

مدیر عامل: مهندس برهانی

آدرس دفتر مرکزی: اصفهان،

میدان آزادی، ابتدای خیابان

سعادت‌آباد، پلاک ۱، طبقه ۴، واحد ۸

تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱۳-۶۶۸۷۷۷۲

نشانی سایت: www.aic.ir



سیماب رزین

مدیر عامل: مهندس اخوین

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا، خیابان شیراز جنوبی،
کوچه فلاحی، پلاک ۲۶

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۲۱۱۲۱۶-۸

نشانی سایت: www.simabresin.com

شرکت بین‌المللی سازنگ تدارک

مدیرعامل: مهندس اتحادی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ظفر، پلاک ۱۷۸، طبقه ۱، واحد ۴

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۲۲۶۵۱۸۰

نشانی سایت: www.sis-company.com**شرکت سرمایه گذاری صدرتأمین**

مدیرعامل: دکتر آیت‌اللهی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان آرژانتین، خیابان احمد قصیر، خیابان شهید احمدیان (پانزدهم)، پلاک ۱۶، ساختمان صدر تأمین

تلفن: ۰۲۱-۸۸۷۲۷۶۶۴

نشانی سایت: www.stic.ir**شرکت صنایع سرام آرا**

مدیرعامل: مهندس آهنی‌ها

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان سپهبد قرنی، بالاتر از چهارراه طالقانی، خیابان شاداب غربی، پلاک ۳۳، طبقه ۶

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۸۹۱۰۴۵

نشانی سایت: www.ceramara.ir**شرکت صنایع کاشی نگار**

مدیرعامل: مهندس لاجوردی

آدرس دفتر مرکزی: اصفهان، خیابان چهارباغ خواجه، جنب بانک ملی، ساختمان چاپ اندیشه، طبقه سوم

تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱۳-۲۲۱۵۷۳۳۳

نشانی سایت: www.negartile.com**شرکت فیبرونا**

مدیرعامل: مهندس شاهپوری

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان میرزای شیرازی، نبش استاد مطهری، شماره ۲۱۱

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۲۳۳۵۵

نشانی سایت: www.fiberona.com**شرکت مهندسی بازرگانی درداران**

سرپر

مدیرعامل: مهندس طهماسبی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ولیعصر، خیابان فتحی شقاقی، میدان سلماس، پلاک ۳، طبقه ۳

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۳۳۷۳۶۶-۸

نشانی سایت: www.sarirco.com**صنایع سرامیک بهرنگ (سهامی خاص)**

مدیرعامل: مهندس پوربابایی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان دولت، بین چهارراه کاوه و قنات، پلاک ۲۸۹، طبقه ۴

تلفن دفتر مرکزی: ۲۲۵۶۸۸۲۸

نشانی سایت: www.behrangco.com**صنایع کاشی خزر**

مدیرعامل: مهندس برازجانی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، ضلع شمال غربی میدان فردوسی، ساختمان شهید، طبقه ۲

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۹۴۵-۷

نشانی سایت: www.khazar-Tile.com**صنایع کاشی زرین خراسان**

مدیرعامل: مهندس شرکت

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا، خیابان شیراز جنوبی، پلاک ۹۹، طبقه اول

تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۰۶۷۶۸۱

نشانی سایت: www.zarrintile.com**صنایع کاشی نیلوفر**

مدیرعامل: مهندس ناصری

آدرس دفتر مرکزی: مشهد، بلوار فردوسی، مجتمع تجاری اسکان، طبقه ۱، واحد ۲

تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۳-۷۶۲۳۳۳۶

نشانی سایت: www.niloofartile.com**صنایع کاشی و سرامیک الوند**

مدیرعامل: مهندس پورهاشمی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان آفریقا، بالاتر از چهارراه اسفندیار، کوچه شهید سعیدی، پلاک ۲۳

تلفن دفتر مرکزی: ۲۲۰۵۷۸۱۱

نشانی سایت: www.alvancer.com**صنایع کاشی و سرامیک سینا**

مدیرعامل: مهندس عزیزیان

آدرس دفتر مرکزی: تهران، بلوار میرداماد، بعد از میدان مادر، پلاک ۲۳

تلفن دفتر مرکزی: ۲۲۲۷۲۳۰۱

نشانی سایت: www.Sinatile.ir

صنعت سرام

مدیرعامل: مهندس غفاری

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان فرجام، بین چهارراه خاور و ولیعصر، پلاک ۶۲۰ واحد ۱۱
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۷۷۷۲۳۵۸۹

فرآورده‌های نسوز آذر شهاب تبریز

مدیرعامل: مهندس صدیقی

آدرس دفتر مرکزی: تبریز، خیابان راه آهن، ایستگاه سرچشمه، مجتمع تجاری میلاد، طبقه ۳، واحد ۳۰۵
تلفن دفتر مرکزی: ۰۴۱۳۵۵۱۸۴۴۱

نشانی سایت: www.azarshahab.com**فرآورده‌های نسوز ایران**

مدیرعامل: مهندس لقمانی



آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان بهار شیراز، خیابان سلیمان خاطر، بعد از ملایری پور، پلاک ۵۱ واحد ۳
تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۳۴۳۴۰۸

نشانی سایت: www.irefco.ir**فرآورده‌های نسوز پارس**

مدیرعامل: مهندس حیدرپور

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان ونک، خیابان ونک، برج آیین ونک، طبقه ۷، واحد ۷۱
تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۷۸۶۶۹۲

نشانی سایت: www.pars-ref.ir**فصلنامه کاشی و سرامیک**

مدیریت: دکتر دین محمدی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان ونک، خیابان ملاصدرا، نبش شیراز جنوبی و کوی بهار، پلاک ۱
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۲۱۲۶۷۸

نشانی سایت: www.tileandceramic.ir**کائولین و خاک‌های نسوز****خراسان**

مدیرعامل: مهندس زیارت نیا

آدرس دفتر مرکزی: مشهد، بلوار فلسطین، فلسطین ۱۴، پلاک ۲۸
تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۳-۷۶۷۳۰۳۴-۵

نشانی سایت: www.kaolin-co.com

شماره ثبت شرکت: ۱۳۸۳۰۳۴۰۳۴
شماره ثبت: ۱۳۸۳۰۳۴۰۳۴
شماره ثبت: ۱۳۸۳۰۳۴۰۳۴

کاشی ایرانا

مدیرعامل: مهندس طلوعی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، کیلومتر ۱۳ جاده مخصوص کرج، روبروی ایران خودرو
تلفن دفتر مرکزی: ۰۵-۴۴۹۰۵۰۰۱

نشانی سایت: www.irana-tile.com**کاشی تیما**

مدیرعامل: دکتر ناصری

آدرس دفتر مرکزی: مشهد، شهرک صنعتی توس، فاز ۲، اندیشه ۲، انتهای دانش ۲
تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۳-۵۴۱۳۹۹۰

نشانی سایت: www.tima-tile.com**کاشی ستاره میبد**

مدیرعامل: مهندس خالقیه

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا، شیراز جنوبی، گرمسار غربی، کوچه بهار، پلاک ۲۶، طبقه ۴، واحد ۷

تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۰۴۴۷۴۴

نشانی سایت: www.setarehtile.com**کاشی طوس**

مدیرعامل: مهندس توکلی فرد

آدرس دفتر مرکزی: مشهد، خیابان سناباد، جنب داروخانه سناباد، ساختمان ۴۶۵، طبقه ۳
تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۳۸۴۱۶۴۱۸

نشانی سایت: www.toostileco.com**کاشی فیروزه مشهد**

مدیرعامل: مهندس سقاء رضوی

آدرس دفتر مرکزی: مشهد، بلوار سجاده، خیابان بیستون ۲، مجتمع تجاری طوس، طبقه ۵ و ۶
سندوق پستی: ۹۱۳۷۵-۴۴۳۷

تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۳-۷۶۷۰۰۰۱

نشانی سایت: www.firoozehtile.com**کاشی کرد**

مدیرعامل: مهندس مرادی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، سهروردی شمالی، هویزه شرقی، پلاک ۳۴

تلفن دفتر مرکزی: ۸۳۵۲۳۳۳۳

نشانی سایت: www.cordgroup.com

کاشی مسعود ایران

مدیر عامل: مهندس فرشادپور
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان آفریقای شمالی، ساختمان مرکز
 تجارت ایران، طبقه ۹، واحد ۶
 تلفن دفتر مرکزی: ۳۷-۲۶۲۱۲۶۳۵
 نشانی سایت: www.masoudtile.com

**کاشی مرجان**

مدیر عامل: مهندس معصومی
 آدرس دفتر مرکزی: اصفهان، خیابان
 چهار باغ بالا، کوچه کاویان، پلاک ۴۱
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱۳-۶۲۴۸۰۱۹
 نشانی سایت: www.marjantileco.com

کسری لعاب میبد

مدیر عامل: دکتر قهرمانی
 آدرس: یزد، شهرک صنعتی جهان آباد، بلوار مریم، فرعی سمت راست
 تلفن: ۰۳۵۳۲۳۷۲۹۳۱

**کاشی نوآوران**

مدیر عامل: مهندس کهدوئی
 آدرس دفتر مرکزی: یزد، میبد،
 شهرک صنعتی جهان آباد، بلوار مریم
 تلفن: ۰۳۵۳۲۳۷۲۱۹۳
 نشانی سایت: www.noavaranceramics.ir

**لعاب مشهد**

مدیر عامل: دکتر یوسفی
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان
 ملاصدرا، خیابان شیراز جنوبی، کوچه اتحاد، پلاک ۱۴، طبقه ۲
 تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۰۴۳۶۹۶

**گلزار فارس**

مدیر عامل: مهندس تازش
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان کریم خان زند،
 خیابان سپهبد قرنی، خیابان برداران شاداب، پلاک
 ۳۳، طبقه ۲
 تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۹۰۸۰۴۴
 نشانی سایت: www.golsarfars.com

**لعاب ایران**

مدیر عامل: مهندس رجایی
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان ونک، خیابان
 گاندی شمالی، کوی شهید صانعی، شماره ۲۵
 تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۷۹۵۱۴۱-۲
 نشانی سایت: www.loab.iran.com

لعاب یاس فارس

مدیر عامل: مهندس کریمی علویچه
 آدرس: شیراز، کیلومتر ۳ جاده شیراز بوشهر، بعد از پل شهید علیپور،
 جاده ایستگاه شماره ۱ گاز
 تلفکس: ۰۷۱۳-۸۳۰۱۹۹۰

مجتمع تولید چینی بهداشتی نوین سرام

مدیر عامل: مهندس حقی
 آدرس دفتر مرکزی: مشهد، چهارراه ابوطالب، مجتمع برجیس، طبقه
 دوم، واحد ۳
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۱۷۲۷۶۰۳۳
 نشانی سایت: www.novinceram.com

مجتمع تحقیقاتی جهاد دانشگاهی استان یزد

مدیریت: مهندس میرحسینی
 آدرس دفتر مرکزی: یزد، خیابان مهدی، جهاد دانشگاهی استان یزد
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۵۱-۸۲۱۲۷۳۰

مجتمع صنعتی اردکان (چینی رز)

مدیر عامل: مهندس ضرابیه
 آدرس دفتر مرکزی: یزد، چهارراه یزد باف، ساختمان یزدباف، طبقه ۲
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۵۳۵۲۲۹۷۶۰
 نشانی سایت: www.chinirose.com

مجتمع تولیدی چینی مقصود

مدیر عامل: مهندس گلکار
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ولیعصر، بالاتر از پارک ساعی،
 نیش کوچه ۳۳، پلاک ۱۱۵۹، طبقه ۲
 تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۸۶۹۸۵
 نشانی سایت: www.magsoudporcelain.com

مجتمع کارخانجات تولیدی توس چینی

مدیر عامل: مهدی کاملان نجار

آدرس دفتر مرکزی: مشهد، ضلع غربی میدان احمدآباد، پلاک ۱۲

تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۳-۸۴۱۶۸۸۰

نشانی سایت: www.toosporcelain.com**معدنی و صنعتی سوراوچین عقیق**

مدیر عامل: مهندس معصومی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، سعادت

آباد، خیابان علامه شمالی، انتهای کوچه

اقبال ملی، پلاک ۱، واحد ۲

تلفن دفتر مرکزی: ۲۲۰۸۱۳۷۳

نشانی سایت: www.iranclay.com

شرکت معدنی و صنعتی سوراوچین عقیق

مفید شیشه

مدیر عامل: مهندس موسوی کریمی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ولیعصر، پایین تر از میدان ونک،

شماره ۲۵۴۰، طبقه ۷

تلفن دفتر مرکزی: ۸۸۶۶۴۸۱۱

نشانی سایت: www.mofidglass.com**مقره سازی ایران**

مدیر عامل: دکتر کورنگی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان بهار جنوبی، کوچه نیلوفر،

شماره ۴

تلفن دفتر مرکزی: ۷۷۵۲۸۶۴۲

نشانی سایت: www.iraninsulator.com**مهندسین مشاور کاوشگران**

مدیر عامل: مهندس رفیعا

آدرس دفتر مرکزی: تهران، انتهای اشرفی اصفهانی، خیابان زیتون،

نش خیابان چمران، کوچه ارغوان یکم، پلاک ۴

تلفن دفتر مرکزی: ۴۴۸۰۶۰۷۰

نشانی سایت: www.kavoshgaranmine.com

تقویم رویدادهای سرامیک

یازدهمین کنگره دوسالانه و دومین همایش بین‌المللی انجمن سرامیک ایران

پژوهشگاه نیرو، تهران

۲۶-۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۶

Congress2017@icers.ir

ایده بازار مهندسی مواد

دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۵-۶ مهر ۱۳۹۵

matideasbazaar@gmail.com

دهمین همایش مشترک و پنجمین کنفرانس بین‌المللی انجمن مهندسی مواد و متالورژی و

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

دانشگاه شیراز

۱۸-۱۹ آبان ۱۳۹۵

info@imatconf.com

سیزدهمین همایش علمی دانشجویی مهندسی مواد و متالورژی ایران

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۵-۶ مهر ۱۳۹۵

cmat.ir

41st International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites

Daytona Beach, FL United States

January, 22-27 2017

<http://ceramics.org/icacc2017>

Glass Association of North America (GANA) BEC Conference

Las Vegas, NV United States

February, 5-7 2017

<http://www.glasswebsite.com/>

Conference & Exhibition of the European Ceramic Society

Istanbul, Turkey

July, 2-6 2017

<http://www.ecers2017.org>

**Ultra-High Temperature Ceramics: Materials for Extreme Environment Applications
IV**

Cumberland Lodge, Windsor, UK
September, 17-20 2017
<http://www.engconfintl.org>

Fractography of Advanced Ceramics V

Smolenice Castle Congress Center, Smolenice SAS
Slovakia
October, 9-12 2016
<http://www.imr.saske.sk/confer/fac2016/index.htm>