

## ارزیابی پارامترهای رئولوژی دوغاب‌های کوردیریتی

محمدجواد ملکی، هودسا مجیدیان<sup>\*</sup>، محمد ذاکری، سارا بنی‌جمالی

پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، مشکین‌دشت، البرز، ایران



چکیده

در این پژوهش روش ریخته‌گری دوغابی بر پایه شیشه سرامیک کوردیریتی بررسی شد. از مواد اولیه اکسیدی و سه نوع روانساز جهت تهیه دوغاب مناسب استفاده شد. نوع فراوری مواد اولیه (مخلوط و کلسینه کردن، مخلوط کردن و ساخت فریت)، زمان آسیاب پودرها (در دو حالت تر و خشک) و درصد روانسازهای مختلف از جمله پارامترهایی بودند که جهت انتخاب شرایط پایدارسازی بررسی شدند. ارزیابی دوغاب‌های تهیه شده با استفاده از آزمون‌های رئولوژی، توزیع اندازه ذرات، پتانسیل زتا، اندازه‌گیری رسوب و سرعت ریخته‌گری انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که دولاپیکس PCN به عنوان بهترین روانساز جهت تهیه دوغاب مورد نظر معرفی می‌شود. رفتار دوغاب‌ها در سرعت‌های برشی پایین رقیق شدن برشی و در سرعت‌های برشی بالا، غلیظ شدن برشی بود. پایداری دوغاب تهیه شده از فریت و چگالی خام بدنه حاصل از آن نسبت به دوغاب‌های دیگر بیشتر بود.

تاریخ دریافت:

۹۶/۷/۱۲

تاریخ پذیرش:

۹۶/۸/۲۷

ریخته‌گری دوغابی، رئولوژی، روانساز، کوردیریت

واژگان کلیدی

## ۱) مقدمه

شکل دهی ایجاد شود، تا پایان به همراه قطعه باقی می ماند و موجب تخریب خواص نهایی می شود. از این رو کنترل پارامترهای مؤثر در فرایند شکل دهی در تمامی این روش ها از اهمیت زیادی برخوردار است. ریخته-گری دوغابی روشی است که به دلیل سادگی فرایند، ارزان بودن و قابلیت شکل دهی اشکال پیچیده مورد توجه قرار گرفته است. در این روش داشتن دوغابی پایدار و روان با بیشترین مقدار ماده ی جامد از اهمیت زیادی برخوردار است. پایداری موجب همگنی محصول نهایی شده و بالا بودن مقدار ماده ی جامد در دوغاب موجب کاهش هزینه های تولید، کاهش انقباض و عیوب ناشی از آن می شود. در نهایت دوغاب باید از روانی مناسبی برخوردار باشد تا بتواند تمامی فضای قالب را پر کند. برای رسیدن به چنین دوغابی دانستن رفتار ذرات و برهمکنش بین آنها در فاز مایع ضروری است.

اندازه ذره در فرایند شکل دهی (به ویژه در روش ریخته گری دوغابی از نظر تأثیر آن بر پایداری، مقدار آب، افزودنی و گرانیروی دوغاب) و سینتر سرامیک ها از اهمیت زیادی برخوردار است. دلیل استفاده از روانساز رسیدن به بیشترین پایداری، کمترین گرانیروی و بیشترین مقدار ماده جامد در دوغاب است. هر یک از این ویژگی ها می تواند به عنوان معیاری جهت تعیین کارایی روانساز مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲) فعالیت های تجربی

### ۱) مواد

مواد اولیه صنعتی شامل سیلیس سبزان، کربنات منیزیم بیرجند، آلومینا<sup>۱</sup> و تیتانیا<sup>۲</sup> بود که برای مخلوط کردن و آسیاب مواد اولیه با نسبت معین (جدول ۱) از جارمیل ۵ لیتری به مدت ۲۴ ساعت استفاده شد.

### ۲) تجهیزات و روش کار

برای شکل دهی دو روش فراوری پودر انجام شد: (۱) ریخته گری دوغابی مواد اولیه (اکسیدها و خاک های مورد نظر)؛ (۲) ریخته گری دوغابی فریت حاصل از ذوب مواد اولیه. در روش اول، مخلوط مواد

در این پژوهش تلاش شد تا امکان استفاده از روش ریخته گری دوغابی جهت شکل دهی ترکیب کوردیریت بررسی شود. کوردیریت با فرمول  $2MgO-2Al_2O_3-5SiO_2$  به خاطر ضریب انبساط حرارتی پایین، ثابت دی الکتریک پایین و مقاومت الکتریکی و مقاومت به شوک حرارتی بالا مورد توجه قرار گرفته است [۱، ۲]. شیشه سرامیک های کوردیریتی در صنایع هوافضا و ساخت ریدوم های محافظ رادار کاربرد دارند [۳]. ریدوم در موشک وظیفه دریافت امواج را بر عهده داشته و در مسیر پرواز موشک در برابر شرایط دمایی بالا، خوردگی، شکست و غیره قرار دارد؛ لذا ماده اصلی جهت انتخاب ریدوم باید شرایط مناسب مکانیکی، الکتریکی و حرارتی را تأمین نماید که سازندگان این محصولات را به سمت مواد سرامیکی و کامپوزیتی سوق داده است. تاکنون مطالعاتی در مورد تهیه شیشه سرامیک های کوردیریتی با استفاده از پودر کوردیریت، پودرهای تالک، کائولن و آلومینا، پودرهای هیدروکسید منیزیم و کائولن به همراه روانساز انجام شده است. از روش سل-ژل نیز برای تهیه شیشه سرامیک کوردیریتی استفاده شده که در مقیاس آزمایشگاهی بوده است [۴-۷]. برای کاربردهای خاص این محصول که خواص الکتریکی و مکانیکی آن مدنظر می باشد، به دلیل حساس بودن محصول به ناخالصی و جذب آب، به طور معمول از مواد اولیه با خلوص بالا استفاده می شود؛ ولی در این مطالعه تلاش شد تا با استفاده از مواد اولیه صنعتی اکسیدی، شرایط پایداری دوغاب شیشه سرامیک های کوردیریتی بررسی شود. استفاده از مواد اولیه صنعتی این اجازه را می دهد تا بتوان فرایند تولید محصول را در مقیاس های تجاری ادامه داد. نتایج این پژوهش، گامی مهم و ضروری در ساخت قطعات و ریدوم های کوردیریتی و بومی سازی ساخت آنها در ایران است.

ریخته گری دوغابی یکی از روش های صنعتی تولید سرامیک ها است. هرگونه عیبی، مانند غیر یکنواختی و یا تخلخل که در طی فرایند

جدول ۱) آنالیز مواد اولیه و درصد استفاده شده در ترکیب

ماده اولیه	ترکیب /%	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%TiO <sub>2</sub>	%MgO	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%Na <sub>2</sub> O	LOI
سیلیس	۵۶/۲۰	۹۹/۳۴	۰/۲۲	-	<۰/۱	<۰/۰۴	<۰/۰۲	<۰/۱	۰/۲۸
آلومینا	۱۹/۸۰	<۰/۱۰	۹۹/۵۰	-	-	<۰/۰۱	<۰/۰۲	<۰/۰۵	۰/۲
کربنات منیزیم	۳۰/۸۷	<۱/۰	<۰/۵۰	-	۴۶/۹۰	-	-	-	۵۲
تیتانیا	۸/۹۰	-	-	>۹۸	-	-	-	-	۰/۴

ریخته گری (ضخامت جداره تشکیل شده) با استفاده از ۹ قالب گچی در زمان های ۱، ۲، ۴ و ۸ دقیقه اندازه گیری شد. چگالی خام نیز با استفاده از نمونه های ریخته گری شده به شکل استوانه و مکعب مستطیل اندازه گیری شد.

### ۳ نتایج و بحث

#### ۳(۱) اندازه ذرات پودر

متوسط اندازه ذرات پودرهای کلسینه و آسیاب شده در جدول ۲ آورده شده است. دیده می شود که اندازه ذرات پس از ۲۴ ساعت آسیاب خشک ۳/۶۸ میکرومتر است که با تغییر آسیاب از خشک به تر، اندازه ذرات به ۳/۱۰ میکرومتر کاهش می یابد؛ با افزایش زمان آسیاب تر از ۲۴ ساعت به ۴۸ ساعت، این مقدار به ۲/۲۰ میکرومتر می رسد. پودر مورد نظر در محیط تر به مدت ۱۲ ساعت آسیاب شد تا اثر آسیاب تر در مدت زمان کمتر نیز بررسی شود؛ ولی اندازه ذرات آن کمتر نبود. افزایش زمان آسیاب خشک نیز موجب تشکیل توده هایی سخت می شد که استفاده از آن مناسب نبود. اندازه ذره در روش ریخته گری دوغابی از نظر تأثیر آن بر پایداری، مقدار آب، افزودنی، گرانیروی دوغاب و در نتیجه افزایش چگالی پس از سینتر اهمیت زیادی دارد. با تغییر محیط آسیاب از خشک به تر و افزایش زمان آسیاب از یک طرف هزینه و انرژی لازم برای تهیه پودر افزایش می یابد و از طرف دیگر اندازه ذرات کوچک تر و توزیع آن باریک تر می شود که به جهت افزایش یکنواختی در قطعه نهایی سودمند است.

با توجه به نتایج اندازه ذرات، سه پودر برای ریخته گری انتخاب شدند: (۱) پودر کلسینه شده که به مدت ۲۴ ساعت به صورت خشک آسیاب شد (c-24)؛ (۲) پودر کلسینه شده که به مدت ۴۸ ساعت به صورت تر آسیاب شد (c-48w)؛ و (۳) پودر فریت شیشه که به مدت ۴۸ ساعت به صورت تر آسیاب شد (g-48w). متوسط اندازه ذرات این پودر ۳/۱۶ میکرومتر بود. تصاویر میکروسکوپی الکترونی سه پودر در شکل ۱ آورده شده است. توزیع اندازه ذرات پهن بوده و ذراتی تا ۱۰ میکرومتر

اولیه خشک شد و برای خارج کردن مواد فرار مانند CO<sub>2</sub> و جلوگیری از هیدراته شدن منیزیا، مخلوط در دمای ۱۲۵۰ °C به مدت ۴ ساعت کلسینه، سپس خرد و از الک مش ۳۰ عبور داده شد. آسیاب مواد در دو حالت خشک و تر با شرایط زیر [۸] انجام شد: (الف) آسیاب خشک: ۵۰٪ گلوله، ۲۵٪ پودر و ۲۵٪ فضای خالی (درصد حجمی)؛ (ب) آسیاب تر: ۵۰٪ گلوله، ۴۰٪ دوغاب و ۱۰٪ فضای خالی (درصد حجمی). مخلوط مواد اولیه به مدت ۲۴ ساعت در حالت خشک و به مدت ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت در حالت تر آسیاب شدند.

در روش دوم، مواد اولیه پس از مخلوط و خشک شدن با استفاده از بوته پلاتینی در دمای ۱۵۸۰ °C به مدت ۲ ساعت ذوب شدند و این مذاب در آب سرد ریخته شد. فریت بدست آمده (با ترکیب شیشه: ۵۶/۲٪ SiO<sub>2</sub>، ۱۹/۸٪ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، ۱۴/۷٪ MgO، ۸/۹٪ TiO<sub>2</sub>) به مدت ۲۴ ساعت در حالت خشک و به مدت ۲۴ و ۴۸ ساعت در حالت تر، و به وسیله ی جارمیل با شرایط قبلی آسیاب شد. پودرهای آسیاب شده از الک های ۲۰۰ و ۴۰۰ عبور داده شدند. از آنجا که درصد بالایی از پودر ۲۴ ساعت آسیاب شده، روی الک ها ماندند، لذا تنها پودر آسیاب شده به مدت ۴۸ ساعت برای ادامه کار انتخاب شد.

دوغاب هایی با مقادیر مختلف ماده جامد و با ۳ نوع روانسازي که قابلیت تهیه دوغاب را داشتند (FF7، دولاپیکس PCN و PC67 برای پودر کلسینه شده؛ TTP، EURO6 و دولاپیکس PCN برای پودر فریت) تهیه شد و سپس در ادامه کار، حداکثر مقدار ماده جامد در نظر گرفته شد.

اندازه ذرات با استفاده از روش های مانده روی الک و دستگاه PSA<sup>۱</sup> تعیین شد. بررسی رفتار دوغاب ها با استفاده از دستگاه ویسکومتر ریزشی و رئومتر<sup>۲</sup>، پتانسیل زتای دوغاب با استفاده از دستگاه زتاسایزر<sup>۳</sup> و آزمون رسوب با استفاده از استوانه مدرج ۱۰ سی سی و برای زمان های ۱ ساعت تا ۴ روز انجام شد. برای انجام صحت آزمون رئومتری، نمونه ها سه بار در دستگاه رئومتر قرار گرفتند و میانگین داده ها آورده شد. مقدار خطای دستگاهی کمتر از ۵٪ بود. سرعت

جدول ۲) متوسط اندازه ذرات پودرهای کلسینه و آسیاب شده

زمان (ساعت)	۱۲	۲۴	۴۸
محیط آسیاب	-	۳/۶۸	-
خشک	-	۳/۶۸	-
تر	۴/۷۵	۳/۱۰	۲/۲۰

1Fritsch particle sizer analysette  
2MCR301  
3Malvern Zetasizer 3000 HSA



نیز در شکل دیده می‌شوند.

### ۲(۳) الگوی پراش پرتو ایکس پودر

مخلوط مواد اولیه در دماهای ۹۰۰، ۱۱۵۰ و ۱۲۵۰ °C کلسینه شد. از آنجا که در دماهای کمتر از ۱۲۵۰ °C مقداری منیزیا در ترکیب باقی می‌ماند (منیزیا پس از فرایند آسیاب و تهیه‌ی دوغاب، هیدراته شده و موجب تخریب خواص دوغاب و ترکیب سینتر شده می‌شود)، و در دمای بالاتر از ۱۲۵۰ °C پودر کلسینه شده به صورت توده‌های سفتی درآمد و فرایند آسیاب را سخت‌تر می‌کرد، لذا دمای ۱۲۵۰ °C برای تکلیس انتخاب شد. الگوی پراش پرتو ایکس پودر کلسینه شده در دمای ۱۲۵۰ °C به مدت ۴ ساعت در شکل ۲ آورده شده است که شامل سیلیس آزاد، کوردیریت و اسپینل است. منیزیا در ترکیب دیده نمی‌شود.

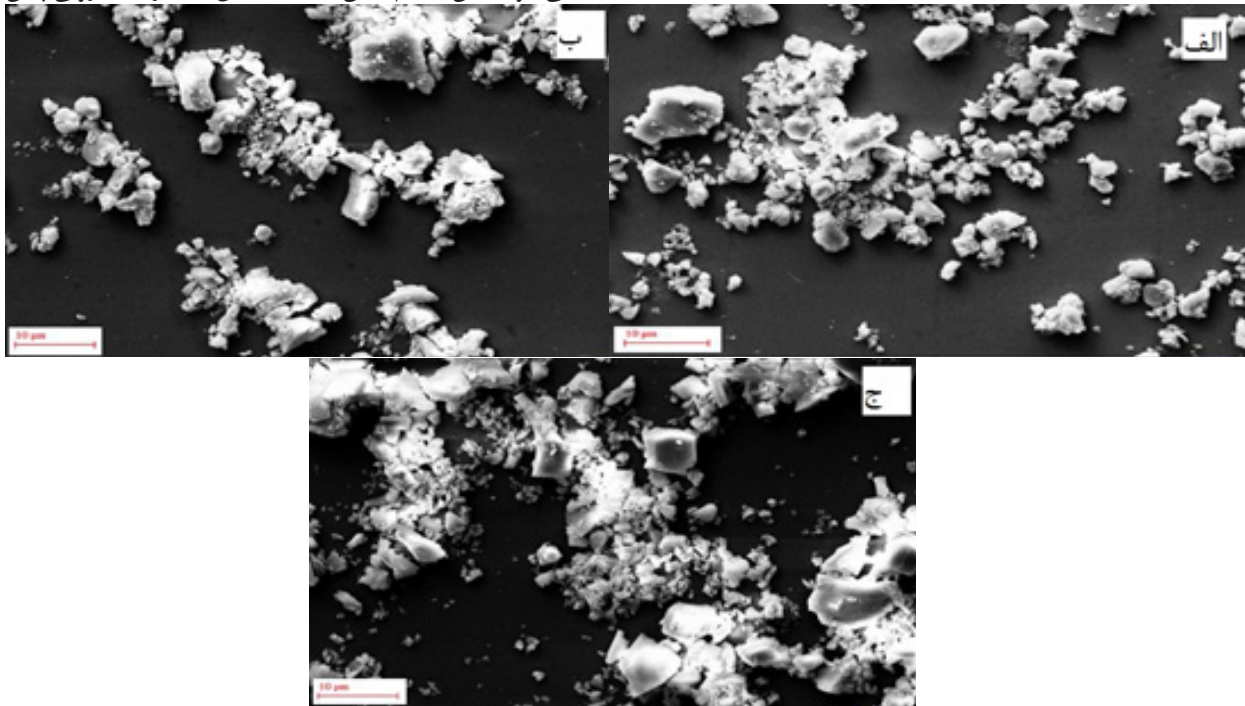
### ۳(۳) رئولوژی

در ابتدا تغییرات زمان عبور دوغاب‌های تهیه شده با سه روانساز مختلف در درصد‌های گوناگون (از ۰/۶ تا ۱/۶%) بررسی شد. شکل ۳الف نشان می‌دهد که زمان عبور و به عبارتی گرانیروی دوغاب c-24 با حداکثر ماده جامد (۷۸%)، با روانسازهای PCN، PC67 و FF7 به ترتیب در مقادیر ۱/۲، ۱ و ۱ درصد روانساز به کمترین مقدار خود می‌رسند؛ در حالی که در دوغاب c-48w با ۷۶% ماده جامد، این مقادیر عبارتند از ۱/۶، ۱/۴ و ۱/۴ درصد (شکل ۳ب).

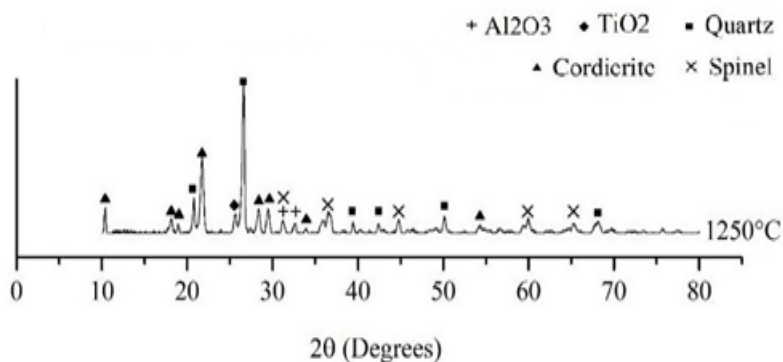
مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که ایجاد سیالیت برای دوغاب c-48w به مقادیر بیشتری از روانساز نیاز دارد که شاید علت آن ریزتر بودن اندازه ذرات پودر باشد. همچنین دیده می‌شود که با تغییر مقدار روانساز، تغییرات ایجاد شده در گرانیروی دوغاب c-48w بسیار کمتر از دوغاب c-24 است؛ یعنی مینیمم منحنی دوغاب c-24 واضح‌تر دیده می‌شود. این امر نشان می‌دهد کاهش اندازه ذرات توانسته است تا حدود زیادی به پایداری دوغاب کمک کند تا جایی که تأثیر حضور روانساز را به حداقل رسانده است. زمان ریزش دوغاب c-48w با حضور PCN (۵۰ ثانیه) بسیار کمتر از دوغاب c-24 است (۱۶۰ ثانیه).

نتایج حاصل از ویسکومتر ریزی برای دوغاب‌های g-48w با ۷۲% ماده جامد در شکل ۳ج نشان می‌دهد که درصد بهینه روانساز برای روانسازهای TPP، Euro6 و PCN به ترتیب ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۶ است. کاهش شدید زمان ریزش با استفاده از روانساز TPP در شکل ۳ج نشان می‌دهد که محدوده استفاده از این روانساز باریک است و در هنگام مصرف باید دقت زیادی به کار رود.

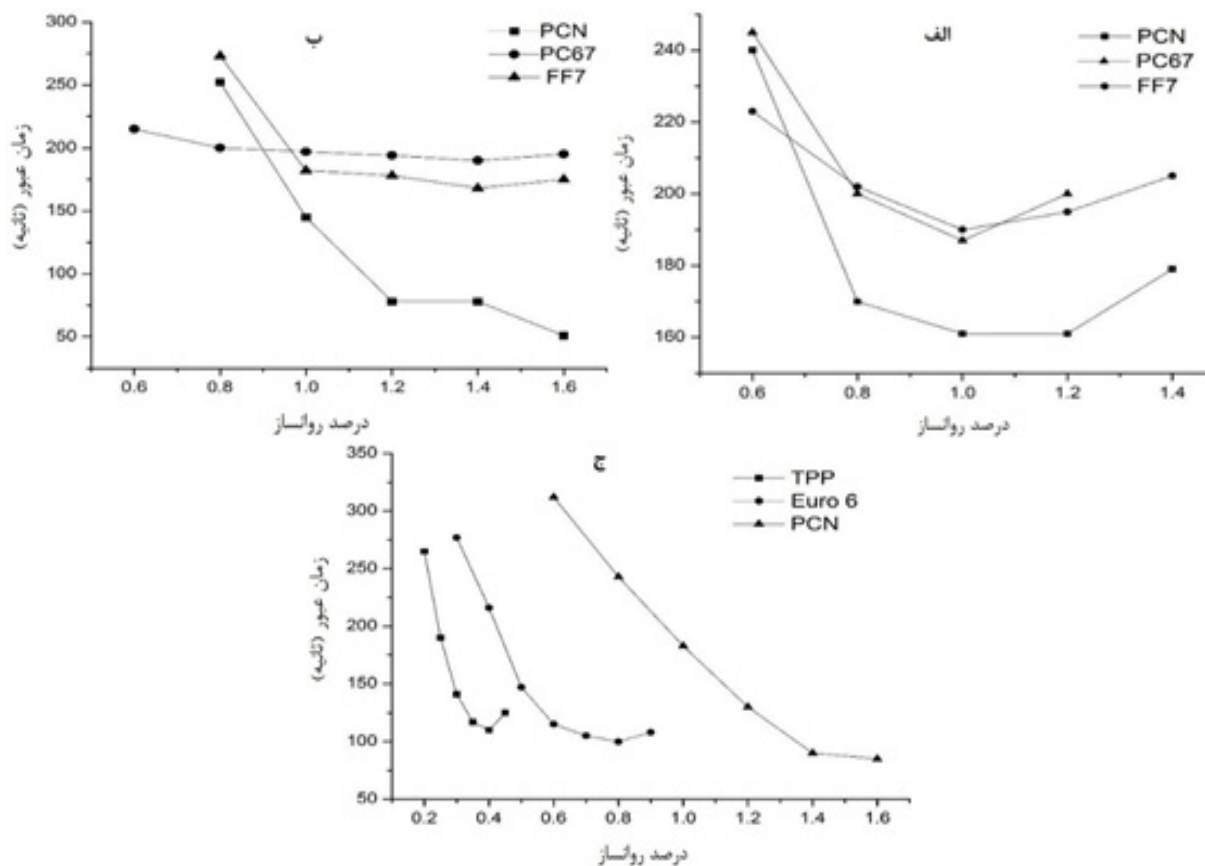
شکل‌های ۴، ۵ و ۶ رفتار رئولوژی دوغاب‌های تهیه شده با استفاده از درصد‌های بهینه‌ی سه روانساز را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که گرانیروی ظاهری (نسبت تنش برشی به سرعت برشی) دوغاب حاوی روانساز PCN نسبت به دو روانساز دیگر کمتر است. مقدار کمی تنش تسلیم در دوغاب تهیه شده با FF7 دیده می‌شود. تنش تسلیم نشان دهنده تشکیل ساختارهای درونی پیش



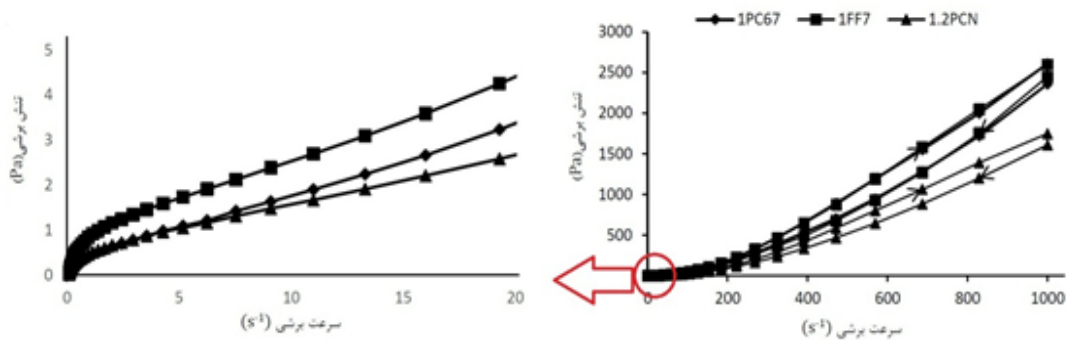
شکل ۱) تصاویر میکروسکوپی پودرهای آسیاب شده (الف) c-24، (ب) c-48w و (ج) g-48w



شکل ۲) الگوی XRD پودر کلسینه شده در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد



شکل ۳) زمان عبور (الف) c-24، (ب) c-48w و (ج) g-48w بر حسب درصد روانسازهای مختلف



شکل ۴) تنش برشی بر حسب سرعت برشی دوغاب c-24 با درصد بهینه ی روانساز

باشد، دوغاب ایده ال تر خواهد بود. کمتر بودن مقدار n از ۱، نشان می دهد که رفتار دوغاب رقیق شدن برشی است [۱۰].

در شکل ۵ نیز با هر سه روانساز رفتار دوغاب ها تیکسوتروپی مثبت است. تنش تسلیم دوغاب با روانساز PC67 بیشتر از دوغاب های دیگر است که نشان می دهد در ابتدا ساختارهای درونی زیادی در این دوغاب تشکیل می شوند. در انتخاب روانساز، توانایی آن در جلوگیری از تشکیل ساختارهای درونی مهم است. برای دو روانساز PC67 و FF7 در سرعت های برش بالا، تنش برشی مقدار ثابتی می شود. این پدیده به این دلیل رخ می دهد که حداکثر گشتاور دستگاه رئومتر مورد استفاده ۱۵۰ mN.m و حداکثر تنش برشی متناظر با آن ۲۸۲۰ Pa.s می باشد. از آنجا که در سرعت های برش بالا، تنش برشی و در نتیجه گشتاور نیرو افزایش می یابد، این اندازه گشتاور خارج از محدوده ی اندازه گیری دستگاه های رئومتری است.

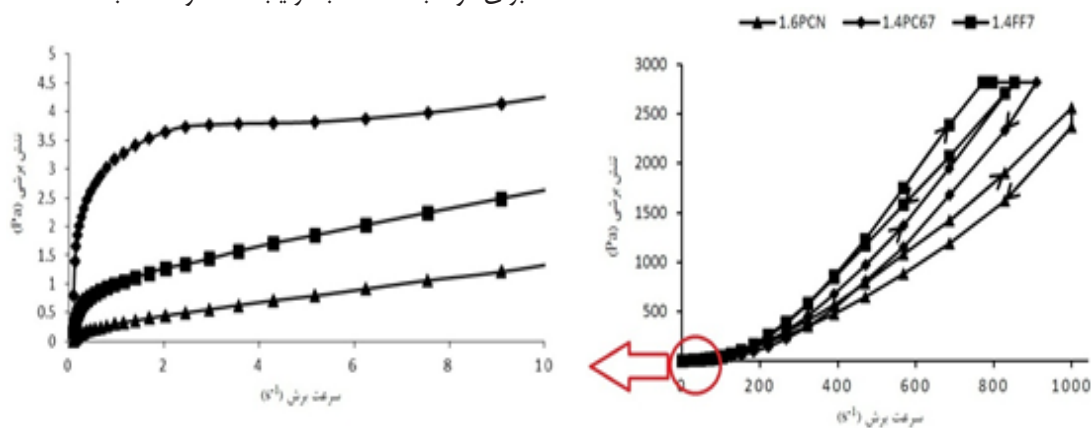
بررسی شکل ۵ در سرعت های برشی کم نشان می دهد که رفتار تمام دوغاب ها رقیق شدن برشی و گرانیروی ظاهری دوغاب با روانساز PCN نسبت به دو روانساز دیگر کمتر است. مقدار m و n برای دوغاب c-48w به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۶۳ به دست آمد. مقدار

از شروع همزدن در دوغاب است و هرچه کمتر باشد بهتر است. با توجه به حلقه ی هیستریزس ایجاد شده در نمودارها، دوغاب ها خاصیت تیکسوتروپی دارند و از آنجا که منحنی رفت بالاتر از منحنی برگشت قرار می گیرد، تیکسوتروپی مثبت است. ویژگی تیکسوتروپی نشان دهنده وابستگی رفتار دوغاب به زمان است که دیده می شود با گذشت زمان، تنش برشی کمتری برای همزدن دوغاب نیاز است.

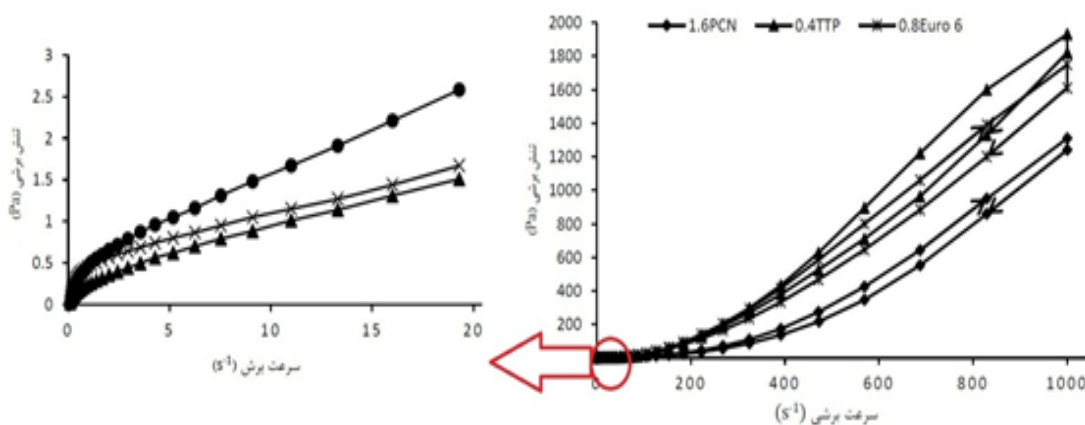
در ریخته گری دوغابی رفتار دوغاب در سرعت های برشی ۱ تا ۱۰ بر ثانیه حائز اهمیت است [۹]. بررسی دقیق تر منحنی رفت در سرعت های برشی پایین نشان می دهد که رفتار تمام دوغاب ها رقیق شدن برشی است و می توان در این محدوده از سرعت برشی، از مدل توانی رابطه ی ۱ استفاده نمود [۹، ۱۰].

$$\tau = m(\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

با رسم منحنی لگاریتمی شکل ۴، مقدار m و n به ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۵۲ به دست آمد. m نشان دهنده عرض از مبدأ (تنش تسلیم) و n ضریب سیالیت است. هرچه m کمتر باشد و n به ۱ نزدیک تر



شکل ۵) تنش برشی بر حسب سرعت برشی دوغاب c-48w با درصد بهینه ی روانساز



شکل ۶) تنش برشی بر حسب سرعت برشی دوغاب g-48w با درصد بهینه ی روانساز



مختلف در جدول ۳ آورده شده است. دیده می شود که با استفاده از روانساز، مقدار پتانسیل زتا کاهش می یابد و منفی تر می شود. پتانسیل زتای دوغاب ها در حدود  $50$  - میلی ولت اندازه گیری شد که نشان دهنده ی پایداری مناسب دوغاب های تهیه شده است؛ البته پتانسیل زتای دوغاب های پودر شیشه منفی تر شده است. مقدار ماده جامد قابل دست یابی در دوغاب های پودر شیشه کمتر از پودرهای تکلیس شده بود که احتمالاً دلیل آن منفی تر بودن پتانسیل زتای آنها است. زیرا با افزایش پتانسیل زتا ضخامت لایه ی مضاعف نیز افزایش می یابد و موجب کاهش فضای در دسترس ذرات و ممانعت از افزایش ماده جامد می شود. پتانسیل زتای پودرهای تکلیس شده بدون روانساز، در حدود  $20$  - mv و پتانسیل زتای پودر شیشه  $16/7$  - mv می باشد. پتانسیل زتای کمتر پودر شیشه نشان دهنده ی بار سطحی (منفی) کمتر آن است. به همین دلیل یون های منفی حاصل از یونیزه شدن روانساز بهتر جذب سطح ذرات شیشه می شوند و بار منفی سطح را بیشتر افزایش می دهند.

هنگامی که پلی الکترولیت در آب حل می شود، یونیزه شده و یک آنیون بزرگ با ده ها بار منفی و چندین یون سدیم ایجاد می کند. این آنیون های بزرگ به سطح ذرات سرامیکی نزدیک شده و جذب سطح می شوند. اگر سطح ذرات دارای بار مثبت باشد، آنیون ها به خوبی جذب سطح می شوند. در حالتی که سطح باردار نباشد، آنیون های بزرگ با نزدیک شدن به سطح در آن بار مثبت القا می کنند و با پیوند واندروالس به سطح می چسبند. افزودن روانساز موجب افزایش pH از  $10$  به  $11/5$  می شود. این پدیده احتمالاً به این خاطر است که آنیون های بزرگ حاصل از یونیزه شدن روانساز با یون های OH- سطح رقابت می کنند و چون بار منفی بزرگ تری دارند، یون های OH- را از سطح جدا کرده و خود جایگزین آنها می شوند و به این ترتیب موجب افزایش pH می شوند.

### ۵(۳) آزمون رسوب

در شکل ۷ نسبت ارتفاع رسوب یا ته نشینی ذرات به ارتفاع کل دوغاب آورده شده است. دوغاب های تهیه شده بعد از گذشت حدود ۲۴ ساعت رسوب حجیمی را تشکیل می دهند و کل حجم دوغاب به صورت شبکه ای ژل مانند در می - آید؛ این ژل یا رسوب حجیم بعد از همزدن به راحتی به دوغاب تبدیل می شود. میزان رسوب دوغاب های هر پودر با روانسازهای مختلف یکسان بود. میزان رسوب ذرات جامد با گذشت زمان نشان دهنده ی میزان پایداری دوغاب است. هر چه دوغاب پایدارتر باشد، دیرتر ذرات آن ته نشین می شود ولی پس از یک زمان مشخص که دوغاب رسوب کرد،

m و n برای دوغاب g-48w نیز به ترتیب  $0/23$  و  $0/60$  به دست آمد. گرانروی و تنش برشی دوغاب g-48w از دوغاب های دیگر کمتر است (شکل ۶).

در فرایند شکل دهی سرامیک ها به روش ریخته گری دوغابی، رفتار رئولوژی دوغاب اهمیت زیادی دارد. یک راه برای جلوگیری از رسوب ذرات دوغاب، افزایش گرانروی آن است؛ ولی در فرایند ریخته گری، گرانروی دوغاب باید به اندازه کافی کم باشد تا بتواند تمام قسمت های قالب را پر کند و حباب های هوا بتوانند از دوغاب خارج شوند. بهترین راه برای حل این مشکل استفاده از دوغاب های دارای خاصیت روان برشی است. زیرا گرانروی این دوغاب ها در هنگام ریخته گری با اعمال تنش برشی کاهش می یابد که به انجام فرایند کمک می کند و در هنگام تشکیل جداره و تکمیل فرایند گرانروی افزایش می یابد و از رسوب ذرات جلوگیری می کند [۱۱].

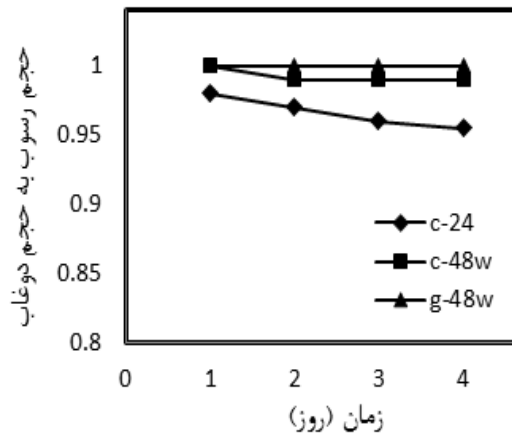
در تمامی دوغاب ها در سرعت های برشی بالا رفتار دوغاب از روان برشی به دیلاتانسی تغییر می کند (شکل های ۴ تا ۶). نیروهای تأثیرگذار بر رفتار رئولوژی سیال به دو دسته تقسیم می شوند: ۱- نیروی اینرسی؛ ۲- نیروی ویسکوزی [۱۲]. در سرعت های برشی پایین نیروی ویسکوزی موجود بین لایه های سیال، حرکت لایه ها را کنترل می کند و موجب حرکت یک بعدی لایه ها نسبت به یکدیگر می شود. با افزایش سرعت برش نیروی اینرسی ناشی از المان های سیال، نیروی غالب است و نیروی ویسکوزی دیگر قادر به حفظ حرکت یک بعدی لایه های سیال نیست. نیروی اینرسی موجب حرکت نامنظم لایه ها و تشکیل جریان های ناآرام یا گردابی و در نتیجه باعث تغییر ظاهری رفتار سیال به دیلاتانسی می شود [۹، ۱۳].

### ۴(۳) پتانسیل زتا

دفاعه ی الکترواستاتیک، مهمترین عامل مؤثر در پایداری دوغاب های آبی و وابسته به میزان دفاعه ی بین ذرات است. حداکثر میزان دفاعه بین دو ذره ی دوغاب در پیک بیشینه موجود در منحنی DLVO ایجاد می شود. ارتفاع این پیک تقریباً برابر است با پتانسیل زتا. بنابراین پتانسیل زتا مهمترین پارامتر قابل اندازه گیری در تعیین میزان پایداری یک دوغاب است. برای این که یک دوغاب پایدار باشد اندازه ی پتانسیل زتا باید بیش از  $25$  mV باشد یا به عبارت دیگر اگر اندازه پتانسیل زتا کمتر از این مقدار باشد دوغاب به سرعت فلوکوله خواهد شد. هرچه اندازه پتانسیل زتا بزرگ تر باشد پایداری دوغاب نیز بیشتر است. pH و پتانسیل زتای دوغاب های تهیه شده با روانسازهای

جدول ۳) پتانسیل زتای دوغاب های تهیه شده

دوغاب	روان ساز	pH	پتانسیل زتا (mV)
c-24	-	۱۰/۵	-۱۹/۵
	٪۱/۲ PCN	۱۱/۶	-۵۲/۲
	٪۱ PC67	۱۱/۴	-۵۳/۱
	٪۱ FF7	۱۱/۷	-۵۱/۰
c-48w	-	۱۰/۶	-۲۰/۲
	٪۱/۶ PCN	۱۱/۸	-۵۳/۶
	٪۱/۴ PC67	۱۱/۵	-۵۲/۳
	٪۱/۴ FF7	۱۱/۸	-۵۲/۹
g-48w	-	۹/۷	-۱۶/۷
	٪۱/۶ PCN	۱۰/۵	-۶۵/۲
	٪۰/۸ Euro6	۱۰/۵	-۶۴/۲
	٪۰/۴ TPP	۱۰/۳	-۵۹/۷



شکل ۷) پتانسیل زتای دوغاب های تهیه شده

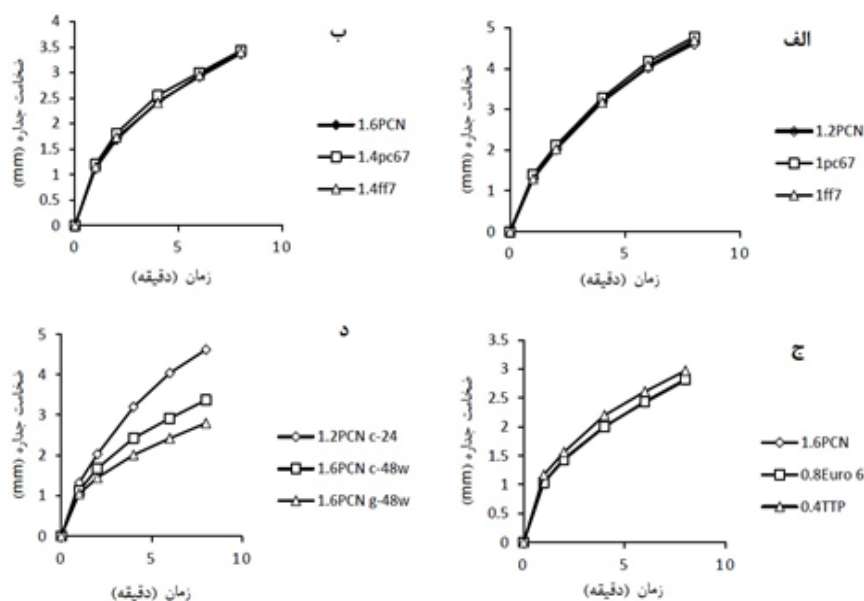
دوغاب پایدارتر باشد، جداره ی تشکیل شده فشرده تر و سرعت فرایند تشکیل جداره کندتر است. برای دوغاب هایی که اندازه ذرات بین ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر دارند، پایداری دوغاب تأثیر چندانی در سرعت تشکیل جداره ندارد، ولی برای دوغاب هایی با اندازه ذرات کوچک تر از ۱۰ میکرومتر، پایداری دوغاب بیشترین تأثیر را بر سرعت ریخته گری دارد [۱۴]. در شکل ۸ سرعت تشکیل جداره برای هر دوغاب با روانسازهای مختلف نشان داده شده است. چگالی خام بیشتر، نشان دهنده ی کارایی بهتر روانساز و شرایط مناسب تر دوغاب است که موجب می شود محصولی با چگالی نهایی بالاتر و انقباض پخت کمتری حاصل شود. در شکل ۸ دیده می شود که دوغاب های c-24 که پایداری کمتری دارند، دارای سرعت ریخته-گری بالاتری هستند. دوغاب های g-48w با پتانسیل زتای منفی تر، پایدارتر بوده و سرعت ریخته گری پایین تری دارند. عامل مؤثر دیگر در چگالی خام حضور حباب در دوغاب و بدنه

هرچه ارتفاع رسوب حاصل بیشتر باشد، نشان می دهد که تأثیر روانساز بهتر است؛ زیرا ذرات رسوبی با حجم زیاد را تشکیل داده اند. با توجه به اینکه در همه نمونه ها رسوبی حجیم تشکیل می شود، احتمالاً منحنی DLVO دارای یک کمینه ثانویه است که بعد از گذشت مدت زمان معینی ذرات داخل این کمینه قرار می گیرند. به این ترتیب رسوبی سست با حجم زیاد و چگالی پایین ایجاد می کنند. این حالت تا حدودی مطلوب است؛ زیرا از طرفی این رسوب با همزدن به راحتی به دوغاب تبدیل می شود و از طرف دیگر از رسوب و جدایش ذرات جلوگیری می کند.

### ۶۳) سرعت ریخته گری و چگالی خام

سرعت ریخته گری (سرعت تشکیل جداره) و چگالی خام به اندازه ذرات و توزیع آنها، پایداری و مقدار ماده جامد دوغاب وابسته است. در یک مقدار ماده جامد و یک توزیع اندازه ذرات ثابت هرچه





شکل ۸) ضخامت جداره تشکیل شده بر حسب زمان (الف) دوغاب c-24، (ب) دوغاب c-48w، (ج) دوغاب g-48w و (د) مقایسه جداره تشکیل شده

بر حسب زمان برای سه دوغاب با روانساز PCN کلوخه ی بزرگ با چگالی پایین تبدیل شود؛ هر چند پیوندهای ایجاد شده در این حالت ضعیف هستند، ولی همین پیوندها از لغزش ذرات در کنار یکدیگر جلوگیری می کنند و مانع رسیدن به چگالی بیشینه می شوند.

#### ۴) نتیجه گیری

بهترین روانساز برای پودرهای c-24، c-48w و g-48w روانساز PCN با درصدهای به ترتیب ۱/۴، ۱/۶ و ۱/۶ بر مبنای وزن پودر خشک به دست آمد. بیشترین مقدار ماده جامد دوغاب های c-24، c-48w و g-48w به ترتیب ۷۸، ۷۶ و ۷۲ درصد وزنی به دست آمد. رفتار دوغاب های تهیه شده در سرعت های برش پایین به صورت رقیق شدن برشی بود ولی با افزایش سرعت برش به دیلاتانسی تغییر پیدا کرد. این تغییر در رفتار دوغاب ها به دلیل برهمکنش های هیدرودینامیکی در سرعت های برش بالا و ایجاد جریان های ناآرام است. با کاهش اندازه ذرات از ۳/۶۸ میکرومتر برای پودر c-24 به ۲/۲ میکرومتر برای پودر c-48w، حداکثر مقدار ماده جامد کاهش و چگالی خام افزایش یافت. چگالی خام با کاهش اندازه ذرات از ۶۰٪ به ۶۲٪ افزایش یافت. کمترین سرعت تشکیل جداره و بیشترین پایداری از نظر آزمون حجم رسوب، در دوغاب g-48w دیده شد.

جدول ۴) چگالی خام بدنه های تهیه شده

نمونه	روانساز	چگالی خام (%)
c-24	۱/۲ PCN	۶۰
	۱ PC67	۶۰
	۱ FF7	۶۰
c-48w	۱/۶ PCN	۶۲
	۱/۴ PC67	۶۰
	۱/۴ FF7	۶۲
g-48w	۱/۶ PCN	۶۳
	۰/۸ Euro6	۶۳
	۰/۴ TPP	۶۲

خام است. حباب ها در فرایند تهیه دوغاب و ریخته گری ایجاد می شوند. دلیل اصلی پایداری آنها کشش سطحی بالای آب است که به عنوان حامل استفاده می شود. دلیل دیگر پایداری حباب ها، گرانروی بالای دوغاب است. در جدول ۴ چگالی خام نمونه های تهیه شده با هر یک از دوغاب ها آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، روانساز PCN برای تمام پودرها مناسب تر دیده می شود.

چگالی خام به عنوان معیاری برای کارایی روانساز به کار می رود. اگر روانساز به خوبی کار نکند ممکن است کل دوغاب به یک

## ۵) مراجع

- [۱۰] R.P. Chhabra, J.F. Richardson, Non-newtonian flow and applied rheology, Oxford, Hungary, 2008, 1-55.
- [۱۱] J. George, Y. Onoda, The rheology of organic binder solutions, Ceramic processing before firing, Wiley, Netherlands, 1978, 235-251.
- [۱۲] دیوید گسکل، سعیدرضا زارع و علیرضا اعلائی (مترجم)، (آشنایی با پدیده های انتقال در مهندسی مواد (سیالات، حرارت، نفوذ ارکان دانش، ۱۳۸۰.
- [۱۳] J W Goodwin, R W Hughes, Rheology for Chemists: an Introduction, Royal Society of Chemistry, Springer, UK, 2002.
- [۱۴] Muhammad N. Rahaman, Ceramic Processing and Sintering, CRC Press, NewYork, 2003, 181-248.
- [۱] James F Shackelford, Young-Hwan Han, Sukyong Kim, Se-Hun Kwon, CRC materials science and engineering handbook: CRC Press, NewYork, 2010, 339-419.
- [۲] Camerucci M, Urretavizcaya G, Castro M, Cavalieri A, Electrical properties and thermal expansion of cordierite and cordierite-mullite materials, Journal of the European Ceramic Society, 21, 2001, 2917-2923.
- [۳] Zanotto E D, A bright future for glass-ceramics, American Ceramic Society Bulletin, 89, 2010, 19-27.
- [۴] Camerucci M A, Cavalieri A L, Moreno R, Slip casting of cordierite and cordierite– mullite materials, Journal of the European Ceramic Society, 18, 1998, 2149-2157.
- [۵] Rodrigues Neto J B, Moreno R, Rheological behaviour of kaolin/talc/alumina suspensions for manufacturing cordierite foams, Applied Clay Science, 37, 2007, 157-166.
- [۶] Rodrigues Neto J B, Moreno R, Effect of mechanical activation on the rheology and casting performance of kaolin/talc/alumina suspensions for manufacturing dense cordierite bodies, Applied Clay Science, 38, 2008, 209-218.
- [۷] Kobayashi Y, Sumi K, Kato E, Preparation of dense cordierite ceramics from magnesium compounds and kaolinite without additives, Ceramics International, 26, 2000, 739-743.
- [۸] Duncan Shaw, Introduction to colloid and surface chemistry, Elsevier Science, NewYork, 2003, 210-241.
- [۹] James S. Reed, Principles of ceramics processing, Wiley, USA, 1995, 260-293.