

## تأثیر زمان سایش بر رئولوژی سوسپانسیون‌های رسی

هدی بلوکی<sup>۱</sup>، حسین سرپولکی<sup>۲</sup>، محمدعلی فقیهی ثانی<sup>۳</sup> و<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات،

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران،

<sup>۳</sup> گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف،

<sup>۴</sup> شرکت آپادانا سرام

hbolouki.81@gmail.com

**چکیده:** این پژوهش از طریق محاسبه پارامترهای مربوط به معادلات رفتار رئولوژیک، اثر زمان‌های سایش مختلف را بر رئولوژی سوسپانسیون‌های رسی بررسی می‌کند. در این راستا رفتار رئولوژیک چهار نوع رس ایرانی با استفاده از دستگاه رئومتر بروکفیلد مورد بررسی قرار گرفته و اثر زمان سایش بر زبره و نیز منحنی‌های سیلان دوغاب‌ها بررسی شده است. تنش تسلیم پلاستیک بینگهام و پارامترهای معادله قانون توانی و شاخص تیکسوتروپی برای تمام دوغاب‌ها محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد رفتار رئولوژیک تمام دوغاب‌ها پزودوپلاستیک بوده و شدت و ضعف آن به نوع رس و نیز زمان سایش سوسپانسیون بستگی دارد. همچنین مشاهده شده است که سوسپانسیون‌های تهیه شده از هر تک خاک رسی، در یک زبره خاص کمترین تنش تسلیم پلاستیک بینگهام، نزدیک‌ترین شاخص سیلان به عدد یک و کمترین ضریب همسانی را نشان می‌دهند و تنها شاخص تیکسوتروپیک در پاره‌ای موارد با بقیه شاخص‌ها همگام نبوده است. لذا می‌توان گفت دوغاب هر تک خاک در یک زبره خاص، اپتیمم رفتار رئولوژیک را نشان داده و اهمیت سایش دوغاب به‌میزان معین برای رسیدن به رئولوژی مطلوب با توجه به نمودارها و جداول مشخص شده است.

**کلمات کلیدی:** دوغاب، رئولوژی، رس، رئومتر بروکفیلد.

### ۱- مقدمه

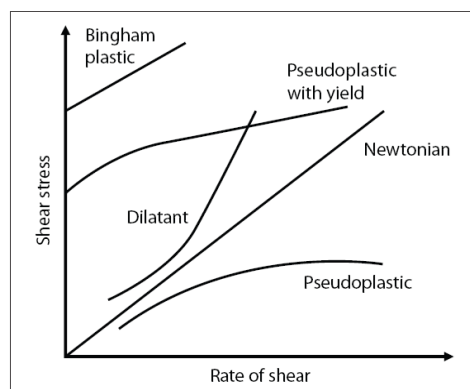
رئولوژی شاخه‌ای از علم است که درباره تغییر فرم و سیلان خمیرها و سوسپانسیون‌ها بحث می‌کند. اهمیت رئولوژی در علم سرامیک واضح است زیرا توسعه تاریخی سرامیک‌ها بر قابلیت تغییر شکل بدنه‌های پلاستیک حاوی رس و تبدیل آن‌ها به اشکال متنوع استوار بوده است [۱]. یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی سرامیست‌ها، انتقال و ترجمه مفاهیم مختلف در برگرفته رفتارهای رئولوژیک، به اصطلاحات فنی هرچه دقیق‌تر می‌باشد. اصطلاحات تجربی رایج در سطح کارخانه، حقیقتاً دانش قابل ملاحظه‌ای از چگونگی تأثیرگذاری فاکتورهای رئولوژیک بر فرآیند تولید را دربرنمی‌گیرد. بنابراین رئولوژی دانشی است که بیشتر بر مبنای سعی و خطا استوار گردیده و تا حد زیادی به صورتی که قابل انتقال و تبدیل باشد بهینه‌سازی نشده است. با این وجود صنعت کاشی و سرامیک برای مدت زمان طولانی بر پایه این گنجینه نامطمئن از دانش استمرار یافته است و بایستی عنوان کرد در زمانی که چرخه‌های تولیدی کندتر بوده‌اند و تبدیل و تحولات با شتاب کمتری انجام می‌پذیرفتند، فرآیندهای تولیدی تا حد زیادی تحت کنترل نگه داشته شده و این سطح از دانش مفید بوده است. اما اینک با وجود بهره‌جستن از تکنولوژی‌های نوین و تب و تاب تغییرات سریع محصولات، زمان زیادی برای انجام دریافت‌های تجربی از رویدادها وجود ندارد. از این‌رو دوغاب بدنه و لعاب بایستی از استانداردهای دقیق تولید که بر اساس واحدهای استاندارد اندازه‌گیری تعریف شده‌اند پیروی نماید [۲]. دانش رفتار رئولوژیک برای طراحی یا انتخاب تجهیزات مربوط به ذخیره سازی، پمپینگ<sup>۱</sup>، انتقال، آسیاب و

<sup>1</sup> Pumping

سایش، میکسینگ<sup>۱</sup>، اتمایزینگ<sup>۲</sup> و شکل دهی یک سیستم سرامیکی ضروری است [۱]. اساساً سیالات بر مبنای معادلات بنیادی به دو دسته سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی تقسیم بندی می‌شوند. برای سیالات ویسکوزیته ظاهری به صورت معادله ۱ می‌باشد، که در آن تنش برشی و نرخ کرنش برشی می‌باشد. پارامتر عمدتاً مورد استفاده ویسکوزیته ظاهری می‌باشد که با  $\eta$  نشان داده می‌شود. در مورد سیالات نیوتنی  $\eta$  ثابت بوده و در مورد سیالات غیر نیوتنی این پارامتر متغیر می‌باشد بدین معنا که ویسکوزیته با نرخ کرنش برشی تغییر می‌کند.

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (1)$$

بیشتر دوغاب‌های مینرالی موجود در طبیعت یا تهیه شده در آزمایشگاه، رفتار غیر نیوتنی از خود نشان می‌دهند. اطلاعات لازمه برای طبقه بندی رفتار رئولوژیک دوغاب‌هایی که رفتار غیرنیوتنی مستقل از زمان دارند در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- نمودارهای تنش برشی به ازای نرخ کرنش برشی برای دوغاب‌های غیر نیوتنی با رفتار مستقل از زمان [۳]

در این میان برخی دوغاب‌های غیر نیوتنی رفتار وابسته به زمان از خود نشان می‌دهند. اینگونه رفتار که با تغییر ویسکوزیته با زمان در یک نرخ برش ثابت شناخته می‌شود اغلب در دوغاب‌های با ذرات بسیار ریز و متراکم شناسایی می‌گردد [۳].

مینرال‌های رسی جزء عمده (۴۰-۵۵ درصد وزنی) تشکیل دهنده دوغاب بدنه‌های سرامیکی سه جزئی می‌باشند. آن‌ها نقش مهمی برای تأمین پلاستیسیته و کارپذیری بدنه خام داشته و در حین پخت نیز با تحمل برخی تغییرات ساختاری، اکسیدهای اصلی تشکیل دهنده برخی فازهای مهم نظیر مولایت را فراهم می‌نمایند [۴]. در تولید کاشی‌های سرامیکی، مواد اولیه و اجزاء لعاب تحت فرآیند کاهش اندازه و آسیاب و هموژناسیون قرار می‌گیرند که آسیاب‌تر پیوسته و ناپیوسته عمده‌ترین تکنولوژی مورد استفاده برای دستیابی به این هدف است. حجم جامد بارگیری شده در این سوسپانسیون‌ها در حدود ۶۳-۶۷٪ وزنی در آب صنعتی می‌باشد و برای دستیابی به ویسکوزیته پایین‌تر در این حجم جامد، اغلب از افزودنی‌های شیمیایی و روانسازها استفاده می‌شود [۵]. در این پژوهش هدف بررسی تأثیر زمان سایش روی یک سری از رفتارهای رئولوژیک این سوسپانسیون‌ها می‌باشد.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

### ۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

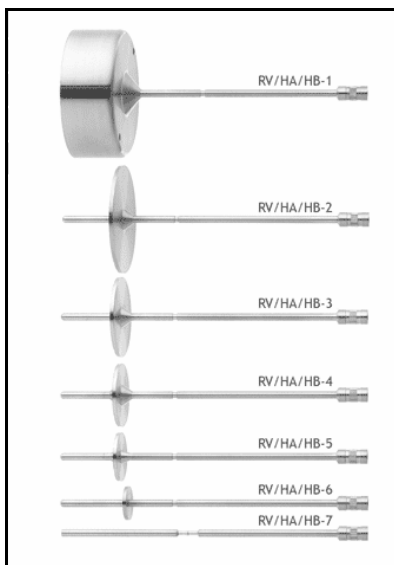
سوسپانسیون‌هایی مجزا از چهار تک خاک رسی ایرانی با کدهای  $K_{10}$  (مربوط به خراسان رضوی)،  $K_{12}$

<sup>1</sup> Mixing  
<sup>2</sup> Atomizing

(مربوط به استان اردبیل)، B14 (مربوط به استان قزوین) و C16 (مربوط به خراسان رضوی) که خاصیت پلاستیک مؤثری در بدنه دارند تهیه گردید. برای کاهش ویسکوزیته افزودنی های تری پلی فسفات سدیم و سیلیکات سدیم به ترتیب در نسبت وزنی ۰/۴ و ۰/۶ درصد خشک استفاده گردیدند. سعی بر این بود که با افزودن میزان مناسب آب دانسیته دوغاب تمام تک خاکها به عدد  $1/7 \text{ gr/cm}^3$  که دانسیته مطلوب و ایده آل برای فرآیند تهیه گرانول در اسپری درایرها می باشد، برسد. اما بدلیل عدم امکان تخلیه از فست میل برای دوغاب های C16 و B14 در این دانسیته، برای آنها دانسیته کمتری (به ترتیب  $1/4 \text{ gr/cm}^3$  و  $1/2 \text{ gr/cm}^3$ ) انتخاب گردید. سپس هر یک از سوسپانسیون ها در زمان های متفاوتی در معرض آسیاب و سایش در فست میل<sup>۱</sup> قرار گرفتند، تا اندازه ذرات رسی کاهش یافته و دوغاب هموزنی به دست آید. در این راستا دوغاب های مختلفی با زبره های متفاوت روی الک ۶۳ میکرون به دست آمد که خواص رئولوژیک آن ها بررسی گردید. همچنین دوغاب هر یک از تک خاکها به زبره ۱/۸ درصد وزنی روی الک ۶۳ میکرون نیز رسیدند تا امکان مقایسه بین تک خاکها فراهم گردد.

## ۲-۲- شناسایی نمونه ها

برای بررسی اثر زمان سایش و زبره روی رئولوژی، نمودارهای سیلان هریک از دوغابها با استفاده از دستگاه رئومتر بروکفیلد مدل RVDV-III Ultra به دست آمد. در شکل ۲ تصویر این دستگاه نشان داده شده است. این دستگاه در واقع یک رئومتر است که گشتاور فنر آن معادل با  $7187/1 \text{ Dyn/cm}^2$  می باشد. با استفاده از اسپیندل های دیسکی شکل که مدل RV نامیده می شوند قادر به قرائت ویسکوزیته سیالات در سرعت های چرخشی مختلف بوده و در صورتی که به تجهیز دیگری به نام Small Sample Adapter مجهز باشد می تواند مقادیر کرنش برشی و تنش برشی ایجاد شده در سیال را در سرعت های چرخش مختلف گزارش نماید. Small Sample Adapter شامل یک محفظه استوانه ای شکل و یک اسپیندل استوانه ای است که سیستم معینی را برای اندازه گیری های دقیق رئولوژیک روی حجم های کوچک نمونه در میزان ۲ تا ۱۶ میلی لیتر را فراهم می کند. کد محفظه مورد استفاده در این آزمایش C4-13R و حجم آن ۱۱ میلی لیتر می باشد [۶]. در شکل های ۳ و ۴ به ترتیب تصاویر اسپیندل های مدل RV و Small sample adapter مورد استفاده دیده می شود.



شکل ۳- اسپیندل های سری RV



شکل ۴- رئومتر بروکفیلد مدل RVDVIII-ULTRA

<sup>1</sup> Fast mill



شکل ۴- تجهیز Small sample adapter

شرایط پیش آماده‌سازی دوغاب‌ها برای آزمون سنجش خواص رئولوژیک مطابق استاندارد ASTM D2196-10 که آزمون استاندارد برای خصوصیات رئولوژیک مواد غیر نیوتنی به‌وسیله ویسکومتر چرخشی (مدل بروکفیلد) می‌باشد، انجام پذیرفت. تمامی دوغاب‌ها قبل از اعمال رژیم برشی به مدت سه دقیقه توسط همزن<sup>۱</sup> به خوبی هم‌زده شده و سپس با رعایت فاصله زمانی حداکثر یک دقیقه در محفظه Small sample adapter تخلیه شدند. سنجش ویسکوزیته نیز در دمای  $24 \pm 2^\circ\text{C}$  انجام گردید [۷]. جهت اعمال رژیم برشی در هر دوغاب، سرعت اسپیندل از ۵ تا  $250\text{ rpm}$  در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه‌ای افزایش یافت و در هر تغییر سرعتی فاکتورهای نرخ برش، تنش برشی، ویسکوزیته و گشتاور، قرائت و ثبت شدند. از آنجا که در بررسی رفتار تیکسوتروپی به نمودار هیستریزس نیاز است نرخ کرنش اعمال شده در مسیر برگشت، به‌صورت نزولی و در فواصل زمانی یکسان با مسیر رفت بر دوغاب اعمال شد.

### ۳- نتایج و بحث

براساس معادلات رئولوژیک ثوابت مربوط به معادله قانون توان (معادله ۲)، برای رفتار سیلانی دوغاب هر تک خاک محاسبه گردید. مدل بینگهام (معادله ۳) برای محاسبه تنش تسلیم هر دوغاب استفاده شد بدین‌صورت که تنش تسلیم بینگهام از اکستراپولیت کردن<sup>۲</sup> بخش خطی نمودار تنش برشی-نرخ کرنش برشی در نرخ‌های کرنش نسبتاً بالا (بیشتر از  $50\text{ s}^{-1}$ ) به‌دست آمد و عرض از مبدأ خط رسم شده به‌عنوان تنش تسلیم بینگهام گزارش گردید [۸]. تیکسوتروپی نیز از محاسبه سطح محصور بین دو منحنی رفت و برگشت در نمودار تنش برشی-نرخ کرنش برشی به‌دست آمد [۹ و ۱۰].

$$\tau = k(\partial v / \partial y)^n \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0 + \eta(\partial v / \partial y) \quad (3)$$

که پارامترهای این دو معادله به شرح ذیل می‌باشند:

$(\partial v / \partial y)$ : نرخ کرنش برشی ( $\text{s}^{-1}$ )

k : ضریب همسانی ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )

n : شاخص رفتار سیلانی

$\eta_p$  : ویسکوزیته پلاستیک بینگهام ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )

<sup>1</sup> Mixer

<sup>2</sup> Extrapolation

$\tau$  : تنش برشی (Pa)

$\tau_0$  : تنش تسلیم اکستراپولیت شده بینگهام :

در جدول ۱ نام فازهای موجود در هر تک خاک ذکر شده است.

جدول ۱- ترکیب مینرالی تک خاک‌های مورد استفاده

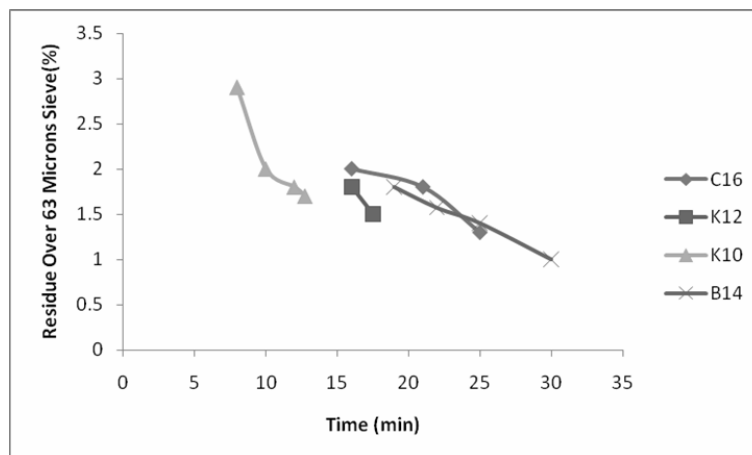
نام نمونه	فازهای مینرالی
K10	کائولینیت، کوارتز، میکا
K12	کائولینیت، کوارتز، آاناتاز، بوهمیت، اسمکتیت
C16	کوارتز، ایلیت، ژیپسوم، مونت موریلونیت، آنورتیت
B14	مونت موریلونیت، کوارتز، اورتوکلاز، کائولینیت

در جدول ۲ ترکیب شیمیایی تک خاک‌ها مشاهده می‌شود.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی تک خاک‌های K10، K12، B14 و C16

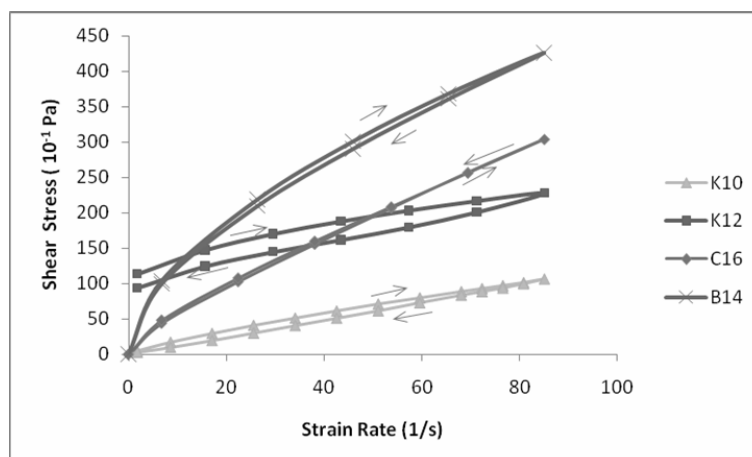
	C16	B14	K12	K10
SiO <sub>2</sub>	۷۸/۸	۵۷/۶۵	۶۴/۹۱	۷۶/۵۳
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۱/۹	۱۶/۹۸	۲۴/۹۸	۱۶/۳۲
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۷۲	۱/۲۴	۰/۴۹	۰/۳۹
TiO <sub>2</sub>	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۸	۰/۱۴
CaO	۰/۶۲	۱/۸۵	۰/۱۷	۰/۱۵
MgO	۰/۳۸	۳/۶۷	۰/۰۵	۰/۰۸
Na <sub>2</sub> O	۰/۲۷	۰/۴۸	۰/۰۳	۰/۱۲
K <sub>2</sub> O	۱/۳۵	۳/۵۲	۰/۰۷	۰/۱۶
SO <sub>3</sub>	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۱	<۰/۰۲
L.O.I	۵/۲۳	۱۳/۳	۸/۸۷	۵/۸۲

شکل ۵ تأثیر زمان سایش دوغاب‌ها بر میزان زبره روی الک را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای دوغاب‌های K10 سرعت کاهش زبره با زمان از بقیه دوغاب‌ها بیشتر بوده و همچنین این دوغاب در زمان‌های کمتر به زبره‌های پایین می‌رسد. این مشاهدات با توجه به ترکیب مینرالی K10 می‌تواند به‌حضور مینرال رسی دولایه‌ای کائولینیت نسبت داده شود. تک خاک K12 در مورد سرعت کاهش زبره با زمان رفتار بینابینی از خود نشان می‌دهد و تک خاک‌های C16 و B14 کمترین سرعت کاهش زبره با زمان را دارند و برای رسیدن به زبره‌های پایین به زمان‌های بیشتری نیاز دارند. حضور کانی‌های سه لایه‌ای متورم شونده و انبساطی در این دو نمونه خاک، به دلیل خاصیت جذب آب و متورم شوندگی، ایجاد چسبندگی نموده که موجب عدم برخورد مناسب گلوله‌ها به مواد شده و در نتیجه فرآیند سایش را مختل می‌نماید. در این میان B14 که یک تک خاک مونت موریلونیتی است از کمترین شیب برخوردار بوده و به بیشترین زمان سایش نیازمند است.



شکل ۵- نمودار کاهش زبره به ازای افزایش زمان سایش برای دوغاب ۴ تک خاک C16, K12, K10 و B14

در شکل ۶ نمودارهای سیلان دوغاب هریک از چهار تک خاک در زبره ۱/۸٪ وزنی مشاهده می‌گردد. همانطور که ملاحظه می‌شود تمام دوغاب‌ها از رفتار پزودوپلاستیک تبعیت می‌کند که شدت و ضعف آن بسته به نوع دوغاب متفاوت می‌باشد. رفتار وابسته به زمان هر چهار دوغاب نیز تیکسوتروپ می‌باشد. برای سایر زبره‌های دوغاب‌ها نیز با همین شرایط نرخ کرنش برشی اعمال و مقادیر پارامترهای مدل قانون توان، تنش تسلیم بینگهام و شاخص تیکسوتروپی به دست آمد که در جدول ۳ قابل مشاهده است.



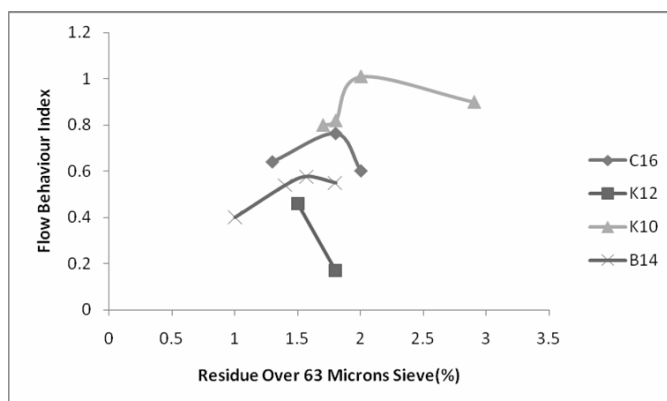
شکل ۶- نمودارهای تنش برشی به ازای نرخ کرنش در دوغاب تک خاک‌های K10, K12, C16 و B14 در زبره ۱/۸

در شکل ۷ نمودار تغییرات شاخص رفتار سیلان دوغاب برحسب زبره برای دوغاب‌های هر چهار تک خاک مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود شاخص رفتار سیلان دوغاب K10 حتی در زبره‌های بالا نیز به عدد یک بسیار نزدیک است و با توجه به اینکه این رس صرفاً یک رس کائولینیتی است رفتار تقریباً نیوتنی از خود به نمایش می‌گذارد. رس C16 یک رفتار بینابینی داشته که با توجه به ترکیب فازی آن به عنوان یک رس ایلیتی این رفتار قابل انتظار است. در این میان رس B14 یک رس مونت موریلونیتی بوده و اختلاف شاخص سیلان دوغاب آن با عدد یک انحراف بالا از رفتار نیوتنی را نشان می‌دهد. همانطور که برای این سه تک خاک مشاهده می‌شود با کاهش زبره تا میزان اپتیمم، شاخص سیلان دوغاب به عدد یک نزدیک‌تر شده و پس از آن مجدداً کاهش می‌یابد. در مورد دوغاب تک خاک K12 با توجه به کمبود تعداد نقاط مورد آزمایش، قضاوت دقیقی نمی‌توان نمود و می‌بایست تست‌ها برای تعداد نقاط بیشتر تکرار شوند.

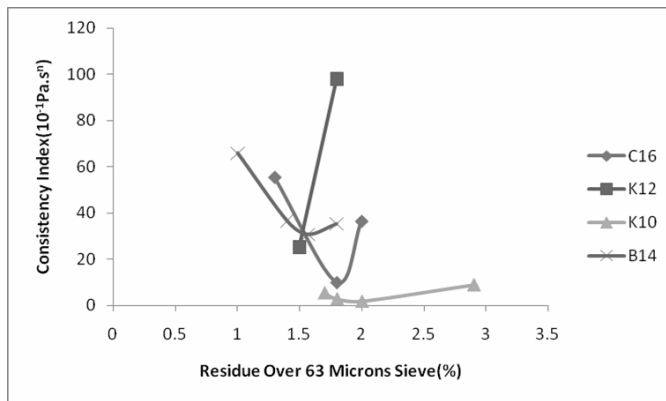
جدول ۳- پارامترهای رئولوژیک دوغاب‌های رسی در زبره‌های مختلف

کد تک خاک	درصد زبره روی الک ۶۳ میکرون	تنش تسلیم بینگهام ( $10^{-1}Pa$ )	شاخص رفتار سیلانی دوغاب اکسترپولیت شده	شاخص همسانی ( $10^{-1}Pa.s^n$ )	تیکسوتروپی ( $10^{-1}Pa.s^{-1}$ )
C16	۱/۳	۵۱۱/۴	۰/۶۴	۵۵/۵۵	۳۰۴۶
	۱/۸	۲۶/۵۴	۰/۷۶۳	۹/۹۴	۱۸۸/۵۸
	۲	۷۹/۴۶	۰/۶۰۱	۳۶/۵	۱۹۲۲/۶۹
K12	۱/۵	۷۵/۷۲	۰/۴۶	۲۵/۰۶	۶۰۳/۲۷۴
	۱/۸	۱۳۴/۲	۰/۱۷	۹۷/۹	۱۴۳۹
K10	۱/۷	۲۴/۸۲	۰/۸	۵/۴۵	۵۴۸/۲۸
	۱/۸	۱۷/۵۱	۰/۸۲	۲/۸۲	۸۶۹/۲
	۲	۱/۵۳	۱/۰۱	۱/۷۵	۱۲۵/۵۳
	۲/۹	۳۶/۱۵	۰/۹	۸/۹۵	۲۰۸۲/۰۶
B14	۱	۱۲۳/۱۱	۰/۴	۶۵/۸۴	۱۲۴۵/۹۱
	۱/۴	۸۳/۳۸	۰/۵۴	۳۶/۶	۱۰۰۳/۸۷
	۱/۵۷	۸۰/۰۴	۰/۵۷۸	۳۰/۷۵	۱۱۱۰/۵۳
	۱/۸	۹۶/۹۲	۰/۵۵	۳۵/۳۱	۴۹۵/۵۷

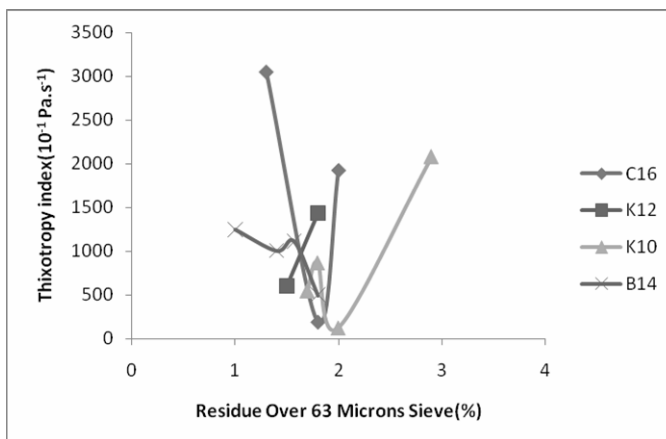
در شکل‌های ۸ تا ۱۰ به ترتیب ضریب همسانی، شاخص تیکسوتروپی و تنش تسلیم اکسترپولیت شده بینگهام به ازای زبره روی الک نشان داده شده است. با دقت در این سه نمودار مشخص می‌گردد که پارامترهای ضریب همسانی، شاخص تیکسوتروپی و تنش تسلیم اکسترپولیت شده برای دوغاب هر چهار تک خاک، با کاهش زبره تا حد اپتیمم، به کم‌ترین میزان کاهش یافته و بعد از آن مجدداً افزایش می‌یابد. به‌طور کلی نمودارها در شکل‌های ۷ تا ۱۰ روند یکسانی را در بروز نقاط اپتیمم از خود نشان می‌دهند و تنها شکل ۹ که مربوط به رفتار تیکسوتروپی دوغاب می‌باشد انحراف کوچکی از روند بقیه نمودارها نشان می‌دهد. به‌طور کلی باید در نظر گرفت که مساحت و شکل حلقه هیستریزیس می‌تواند شدیداً با توجه به نوع ماده تغییر کند. برای یک ماده خاص مساحت محدود شده بستگی به شرایط تست از قبیل تاریخچه برشی قبل از انجام تست، ماکزیموم نرخ برش اعمالی و سرعت افزایش نرخ برش دارد. در بهترین حالت روش محاسبه مساحت حلقه هیستریزیس فقط یک میزان نسبی از تیکسوتروپی را به دست می‌دهد. باید یادآوری کرد که تغییرات برگشت ناپذیر در نمونه نیز می‌تواند ایجاد هیستریزیس نماید [۱۰]. لذا شاید روش محاسبه مساحت حلقه هیستریزیس روش چندان مناسبی برای محاسبه میزان دقیق تیکسوتروپی نباشد.



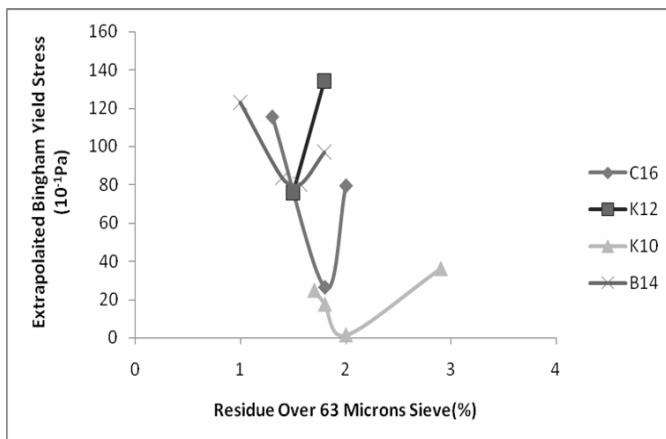
شکل ۷- شاخص رفتار سیلان دوغاب به ازای زبره روی الک



شکل ۸- ضریب همسانی دوغاب به ازای زبره روی الک



شکل ۹- شاخص تیکسوتروپی به ازای زبره روی الک



شکل ۱۰- تنش تسلیم اکستراپولیت شده بینگهام به ازای زبره روی الک

#### ۴- نتیجه گیری

برای سوسپانسیون‌های رسی به دست آمده رفتار رئولوژیک می‌تواند به صورت پزودوپلاستیک گزارش شود. اما برای سوسپانسیون‌های رس کائولینیته درجه پزودوپلاستیسته کمتر از سوسپانسیون‌های مشتمل بر رس‌های مونت موریلونیتی و یا گروه‌های ایلیتی می‌باشد و لذا دوغاب نمونه K10 رفتار تقریباً نیوتنی از خود نشان می‌دهد. همچنین درجه پزودو پلاستیته برای دوغاب هر تک خاک شدیداً بوسیله زمان سایش قابل کنترل است. همگامی روند افزایشی یا کاهش‌ی شاخص‌های رئولوژیک نظیر شاخص رفتار سیلانی دوغاب و ضریب همسانی در معادله قانون توان و شاخص تیکسوتروپی و تنش تسلیم بینگهام با یکدیگر، نشان از تأثیر انتخاب



زمان سایش مناسب برای رسیدن دوغاب به رئولوژی مطلوب دارد. لذا برای دستیابی به دوغابی با رفتار رئولوژیک مطلوب در هنگام تولید، انتخاب زمان سایش مناسب و بهینه از طریق محاسبه پارامترهای رئولوژیک و ترسیم منحنی‌های رفتار سیلان بر حسب زمان‌های سایش مختلف، می‌تواند بسیار راهگشا باشد.

## مراجع

- [1] J. S Reed, "Introduction to Principles of Ceramic Processing", Jone Wiley & Sons, New York, 2nd ed, 1977, pp. 277-291.
- [2] Sacmi Imola, "Applied ceramic technology", Volume I. Sacmi Imola Research center, 1st ed 2002, pp. 191-228.
- [3] M. He, Y. Wang, E. Forssberg, "Slurry Rheology in Wet Ultra Fine Grinding of Industrial mineral: a review", Powder Technology, Vol. 147, 2004, pp. 94-112.
- [4] F. Andreola, C. Siligardi, T. Manfredini, C. Carbonchi, "Rheological Behavior and Mechanical Properties of Porcelain Stoneware Bodies Containing Italian Clay Added with Bentonite" Ceramic International Vol 35, 2009, pp. 1159-1164.
- [5] M. Romagnoli, F. Andreola, "Mixture of Deflocculants: A Systematic Approach", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 27, 2007, pp. 1871-1874.
- [6] Brookfield DV-III ULTRA, Programmable Rheometer, Operating Instructions, Manual NO.M/211-BO104.
- [7] ASTM, D2196-99, "Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield Type) Viscometer.
- [8] A. Nosrati, J. Addai-Mensah, W. Skinner, "Rheology of Aging Aqueous Muscovite Clay Dispersions", Chemical Engineering Science, Vol 66, 2011, pp. 119-129.
- [9] E. Tobacz, M. Szekeres, 2006, "Surface Charge Heterogeneity of Kaolinite in Aqueous Suspension in Comparison With Montmorillonite", Applied Clay Science ,Vol 34, pp. 105-124.
- [10] J. Mevis, N. J. Wagne, 2009, "Thixotropy", Advances in Colloid And Interface Science Vol 147-148, pp.214-227.

