بهبود تراکم‌پذیری باطله فراوری سنگ آهن به کمک سطح سازهای آنیونی

سعید حبیبی نژاد، محمدرضا گرمسیری *+
گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان، سیرجان، ایران

سعید غفاری
کارشناس ارشد فرایند، امور فراوری، شرکت معدنی و صنعتی گل گهر

چکیده: *تراکم پذیری دوغاب نقش بسیار چشمگیری در عملکرد تجهیزات پیشرفته آبگیری مانند تیکنرهای خمیری و فیلترها دارد. از آنجا که تراکم‌پذیری دوغاب‌های معدنی تابع نیروهای بین ذرات است، مطالعه این نیروها می‌تواند برای یافتن راه‌حل عملی برای بهبود تراکم‌پذیری موثر باشد. یکی از روش‌های بهبود تراکم‌پذیری دوغاب‌های معدنی، استفاده از مواد شیمیایی (سطح‌سازها، Surfactants) بمنظور تغییر نیروهای بین ذرات است. در این پژوهش تاثیر سطح‌سازهای آنیونی سدیم دو دسیل سولفات (SDS) و سدیم لوریل اتر سولفات (SLES) بر تراکم‌پذیری و قابلیت فیلترشوندگی باطله فراوری سنگ آهن و نیز مکانیسم عملکرد این دو سطح‌ساز بررسی شد. بدین منظور آزمایش‌های قیف بوخنر برای ارزیابی تاثیر سطح‌سازها بر تراکم‌پذیری و فیلترشوندگی دوغاب انجام شد. سپس برای ارزیابی برهمکنش احتمالی بین سطح‌ساز و فلوکولانت آزمایش‌های ته‌نشینی انجام شد. نهایتا بمنظور ارزیابی مکانیسم عملکرد این سطح‌سازها اندازه‌گیری پتانسیل زتا، ارزیابی شکل قطره و انجام آزمایش‌های FTIR و TG-DTA مد نظر قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از این دو سطح‌ساز آنیونی SDS و SLES تأثیر معناداری بر کاهش رطوبت کیک فیلتر دارند. همچنین نرخ مصرف بهینه این مواد حدود ۹۰ گرم بر تن بود و میانگین کاهش رطوبت در کیک فیلتراسیون حدود ۳٪ بدست آمد. همچنین نشان داده شد که این دو سطح‌ساز با تغییر پتانسیل زتا و ایجاد آبرانی سطوح جامد، موجب بهبود تراکم پذیری دوغاب می‌شود. نهایتا اینکه در حضور این دو سطح ساز در کنار فلوکولانت، سرعت ته‌نشینی بطور چشمگیری بهبود یافت بطوریکه بیش از پنج برابر افزایش یافت. این نتایج نوید بخش این نکته است که استفاده از این سطح‌سازها موجب بهبود تراکم پذیری دوغاب (در تیکنرهای خمیری و فیلتراسیون) می‌شود و بازیابی آب بیشتر از باطله فراوری سنگ آهن ممکن می‌شود. بدین ترتیب با استفاده از SDS و SLES استفاده از روش‌های پیشرفته انباشت باطله مانند Stacking و دستیابی به معدنکاری پایدار محقق می‌شود.*

کلمات کلیدی: *آبگیری، تراکم‌پذیری، سطح‌ساز، باطله، فراوری سنگ آهن.*

KEYWORDS: *Dewatering, Filtration, Surfactant, Residual, Iron ore processing*

مقدمه

در فرآوری مواد معدنی آبگیری از جریان باطله با اهداف مختلفی صورت می‌گیرد که این اهداف عبارتند از: کاهش هزینه‌های انباشت باطله و کاهش آسیب‌های زیست محیطی و کاهش هزینه‌های عملیاتی تولید در اثر صرفه‌جویی در مصرف آب. درکشورهای مختلف بسته به

* عهده‌دار مکاتبات
+E- mail: m.r.garmsiri@gmail.com

میزان توسعه یافتگی، دسترسی به منابع آبی و اهمیت محیط زیست اولویت هر یک از اهداف ذکر شده متفاوت است. برای مثال در کشورهایی که منابع آبی محدودی دارند توجه به بازیابی آب بیشتر اهمیت دارد اما در کشورهای توسعه یافته غالبا الزامات و محدودیت‌های زیست محیطی اولویت و هدف اول آبگیری است. در همه کشورها نیز کاهش هزینه‌های انباشت باطله هدف مهمی برای آبگیری محسوب می‌شود[۱]. از اینرو می‌توان گفت در هر کشور و صنعت انگیزه‌های آبگیری متفاوت است.

در فرآوری سنگ آهن، آبگیری از باطله از آن جهت حائز اهمیت است که بخش قابل توجهی از کل باطله‌های معدنی تولید شده در دنیا به باطله فرآوری سنگ آهن مربوط می‌شود[۲]. از اینرو آبگیری از این حجم چشمگیر از باطله می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در کاهش مصرف منابع آبی داشته باشد. بهبود آبگیری از باطله فراوری سنگ آهن زمانی اهمیت بیشتری خواهد داشت که تامین آب مورد نیاز از منابع تجدیدناپذیر زیرزمینی صورت گیرد. در این شرایط می‌بایست حداکثر تلاش برای بازیابی بیشترین آب ممکن با هدف صیانت از منابع آبی زیرزمینی صورت گیرد.

در فرآوری مواد به منظور آبگیری از باطله، مدارهای متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رایج‌ترین تجهیز آبگیری تیکنر است اما امروزه با توجه به الزامات زیست محیطی و همچنین نیاز به بازیابی آب بیشتر، از مدارهای پیچیده‌ای شامل تیکنر و فیلتر نیز استفاده می‌شود[۳]. در تیکنرها فرایند آبگیری از ته‌نشینی و تراکم (فشردگی) تشکیل می‌شود اما در فیلترها تنها تراکم (Compression) اهمیت دارد[۴]. تراکم‌پذیری دوغاب‌های معدنی تابع عوامل مختلفی از جمله خصوصیات دوغاب (غلظت جامد، ابعاد ذرات و ...)، مواد شیمیایی موجود و خصوصیات محیط فرایند است[۵]. بنابراین در صورتیکه در اثر تغییر برخی پارامترها قابلیت تراکم‌پذیری دوغاب بهبود یابد، این مساله می‌تواند موجب بهبود راندمان آبگیری در تیکنرها و فیلترها شود.

تراکم‌پذیری دوغاب‌های معدنی به نیروهای بین ذرات (Interparticle forces) وابسته است. زمانیکه ذرات در شرایط سوسپانسیون و در محیط آبی قرار می‌گیرند، نیروهای بین ذرات ظاهر می‌شوند که عبارتند از [۵–۶]:

- ✓ واندروالس (Van der Waals)
- ✓ دولایه الکتریکی (Electrical double layer)
- ✓ هیدراسیون (Hydration)
- ✓ استریک (Steric)
- ✓ آبرانی (Hydrophobic)
- ✓ پل زدن (Bridging)

برخی از نیروهای ذکر شده از نوع جاذبه و برخی از نوع دافعه هستند. همچنین این نیروها فواصل تاثیر متفاوتی دارند بطوریکه برخی در فاصله نزدیک و برخی در فاصله دور موثر هستند. برایند این نیروها تعیین کننده غلبه نیروی دافعه یا جاذبه در فواصل متفاوت بین ذرات است.

در محیط سوسپانسیون سطوح ذرات غالبا باردار می‌شوند. در فاصله کوتاهی نسبت به سطح ذرات، بارهای الکتریکی مخالف بار سطحی تجمع پیدا می‌کنند که بصورت یک لایه است. این لایه از سیال که به ذره چسبیده و همراه با آن جابجا می‌شود لایه استرن (Stern) نام دارد. لایه دوم که نفوذ (Diffuse) نامیده می‌شود در فاصله بیشتری نسبت به سطح ذره قرار دارد و عمدتا از بار مخالف سطح تشکیل شده است[۷]. به این دولایه روی هم دولایه الکتریکی گفته می‌شود. به برایند بارهای الکتریکی روی مرز لایه‌های استرن و نفوذ پتانسیل زتا گفته می‌شود. قابل ذکر است که افزایش پتانسیل زتا به معنای افزایش بار سطحی ذرات است. نهایتا اینکه برایند نیروها تعیین کننده قابلیت جریان یافتن (Flowability)، رئولوژی (Rheology) و تراکم‌پذیری دوغاب است[۵]. از این رو مطالعات گسترده‌ای در زمینه تاثیر عوامل مختلف بر بزرگی این نیروها و نتیجتا رئولوژی و تراکم‌پذیری دوغاب انجام شده است.

پژوهشگران زیادی تاثیر عوامل مختلف بر نیروهای بین ذرات را مورد بررسی قرار دادند. مهم‌ترین عاملی که می‌تواند موجب افزایش نیروهای جاذبه بین ذرات، افزایش مقاومت دوغاب و نتیجتا کاهش تراکم‌پذیری شود، افزایش غلظت جامد دوغاب است[۲ و ۵]. *بوگر* نشان داد در همه دوغاب‌های معدنی با افزایش غلظت جامد مقاومت دوغاب در مقابل تراکم بطور نمایی افزایش می‌یابد[۲]. گرمسیری و حاجی امین شیرازی [۵] تاثیر فلوکولانت بر نیروهای بین ذرات را بررسی کردند. ایشان نشان دادند که با افزایش نرخ مصرف فلوکولانت نیروهای جاذبه بین ذرات و نتیجتا مقاومت دوغاب در مقابل تراکم‌پذیری افزایش می‌یابد. این مساله توسط پژوهشگران دیگری نیز نشان داده شده بود[۸]. *جانسون*[۱] و *همکاران* [۹] تاثیر pH و بار سطحی ذرات بر مقاومت و تراکم‌پذیری دوغاب را بررسی کردند. ایشان نشان دادند بیشترین مقاومت دوغاب معادل با کمترین قابلیت تراکم‌پذیری آن در نقطه ایزوالکتریک (IEP) مشاهده می‌شود. قابل ذکر است که مفهوم نقطه بار صفر PZC و نقطه ایزو الکتریک IEP متفاوت هستند[۲]، اگرچه بعضا بجای هم بکار می‌روند. گرمسیری و حاجی امین شیرازی [۵] تاثیر pH بر تنش تسلیم برشی دوغاب باطله فراوری مس را بررسی کردند.

(۱) Johnson.

(۲) نقطه بار صفر (Point of zero charge, PZC) به نقطه‌ای که گفته می‌شود که در آن برایند بارهای مثبت و منفی روی ذره صفر باشد. نقطه ایزوالکتریک (Isoelectric point) به نقطه‌ای گفته می‌شود که در آن سطح ذره بی‌بار است.

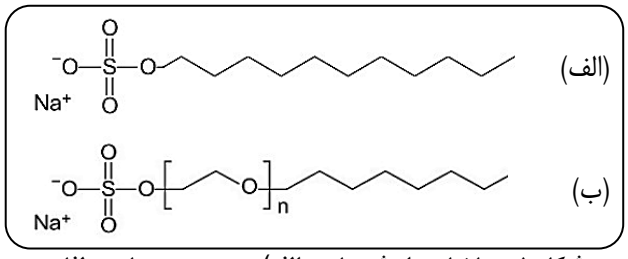
ایشان نشان دادند که با افزایش pH تنش تسلیم برشی و مقاومت دوغاب افزایش یافت.

در سال‌های اخیر پژوهشگران زیادی نقش سطح‌سازها (Surfactants) بر بهبود تراکم‌پذیری و فیلترشوندگی دوغاب‌های معدنی مختلف را بررسی کردند[۱۰ تا ۱۴]. مکانیسم عملکرد سطح‌سازها متفاوت است و هر یک با تاثیر بر یک یا چند نیرو از نیروهای بین ذرات موجب بهبود تراکم‌پذیری و فیلترشوندگی دوغاب می‌شود. *اجتماعی* و *همکاران* [۱۳] استفاده همزمان از سطح‌ساز و فلوکولانت در بهبود آبگیری فیلتراسیون زغال را بررسی کردند. ایشان نشان دادند که استفاده از سطح‌ساز می‌تواند موجب بهبود راندمان فیلتراسیون زغال شود. *بسرا*[1] و *همکاران* [۱۲] تاثیر همزمان استفاده از سطح‌ساز در کنار فلوکولانت بر فیلتراسیون کائولینیت را بررسی کردند. ایشان نشان دادند در حضور این سطح‌ساز راندمان آبگیری افزایش یافت. *پاترا*[2] و *همکاران* [۱۱] نشان دادند که استفاده از سطح‌ساز موجب بهبود راندمان فیلتراسیون کنسانتره آهن خواهد شد. محققین دیگری نیز تاثیر همزمان سطح سازها و فلوکولانت‌ها بمنظور بهبود رفتار آبگیری را بررسی کرده‌اند[۱۵ و ۱۶]. بدیهی است به ازای هر کانی، سطح سازهای متفاوتی می‌توانند بمنظور بهبود قابلیت آبگیری مورد استفاده قرار گیرند.

معادن بزرگ سنگ آهن ایران مانند گل‌گهر در مناطق کم آب و کویری ایران واقع شده‌اند. از سوی دیگر در سال‌های اخیر با توجه به هزینه قابل توجه تامین آب تازه از خلیج فارس، توجه بیشتری به تجهیزات پیشرفته بازیابی آب مانند فیلترها برای آبگیری از باطله فراوری سنگ آهن صورت گرفته است. از آنجا که تراکم (Compression) مهم‌ترین فرایند در کارایی فیلترهای فشاری و تیکنرهای پیشرفته محسوب می‌شود، در این پژوهش امکان استفاده از سطح‌سازهای سدیم دو دسیل سولفات (SDS) و سدیم لوریل اتر سولفات (SLES) برای بهبود تراکم‌پذیری باطله فراوری سنگ آهن مورد بررسی قرار گرفته است. اگر چه سطح‌سازها قبلا برای بهبود فیلترشوندگی کنسانتره کانی‌های مختلف از جمله کنسانتره سنگ آهن استفاده شده اما تا جاییکه نویسندگان آگاه هستند استفاده از آنها برای بهبود فیلترشوندگی باطله فراوری سنگ آهن مورد توجه قرار نگرفته است. علاوه بر آن استفاده همزمان از فلوکولانت و سطح‌سازهای ذکر شده برای ارزیابی تاثیر منفی احتمالی سطح‌سازها بر عملکرد فلوکولانت بررسی شده است. نهایتا مکانیسم عملکرد و جذب این سطح‌سازها روی سطح ذرات بررسی شده است.

مواد و روش کار

بمنظور ارزیابی تاثیر سطح‌ساز، نمونه‌برداری ذرات باطله در طول سه روز از خط ۵ تولید کنسانتره گل گهر انجام شد. با هدف استفاده از یک نمونه یکسان و یکنواخت نمونه های مختلف پس از رطوبت زدایی



شکل ۱- ساختار مواد شیمیایی؛ الف) سدیم دو دسیل سولفات و ب) سدیم لوریل اتر سولفات

کامل در یک خشک کن، با هم ترکیب شد. آنگاه نمونه مد نظر تقسیم شد و در بسته‌های کوچک بسته‌بندی شد تا از واکنش با هوا اجتناب شود. آنگاه آنالیز سرندی برای تخمین اندازه ذرات انجام شد. نتایج نشان داد d_{80} ذرات معادل با ۹۰ میکرون و دانسیته جامد ۳٫۱ بود. در این پژوهش آزمایش‌های قیف بوخنر برای ارزیابی تاثیر سطح‌ساز بر قابلیت تراکم دوغاب مورد استفاده قرار گرفت. سپس برای ارزیابی تاثیر استفاده همزمان سطح‌ساز و فلوکولانت و تاثیر مخرب احتمالی این سطح‌سازها بر عملکرد فلوکولانت، آزمایش‌های ته‌نشینی انجام شد. آنگاه آزمایش‌های اندازه‌گیری پتانسیل زتا، شکل قطره، طیف فروسرخ و TG برای اطمینان از جذب و مکانیسم عملکرد این سطح‌سازها انجام شد.

در آزمایش‌های انجام شده، سدیم دو دسیل سولفات (SDS) و سدیم لوریل اتر سولفات (SLES) از شرکت مرک آلمان تهیه شد. شکل ۱ نمایی از ساختار این دو ماده شیمیایی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این دو ماده ساختار شیمیایی کاملا مشابهی دارند و تفاوت آنها ناچیز است.

آزمایش فیلتراسیون قیف بوخنر

این آزمایش با هدف ارزیابی قابلیت فیلترشوندگی و تعیین ابعاد فیلتر مورد نیاز بر مبنای فیلتراسیون خلا انجام می‌شود. در این آزمایش یک قیف که روی آن پارچه فیلتر قرار دارد، روی یک استوانه مدرج نصب می‌شود بطوریکه محل اتصال آنها کاملا نفوذناپذیر می‌شود. برای انجام آزمایش نمونه دوغاب ۶۰ درصد ذرات باطله، مطابق با درصد جامد ورودی و ضخامت کیک فیلتر تشکیل شده ذرات پرعیار شده روی فیلترهای نواری کارخانه پرعیارسازی شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، به مقدار لازم از ذرات باطله کاملا خشک توزین شده و در ارلن یک لیتری حاوی محلول سطح ساز آماده سازی شد و زمان ۵ دقیقه همزنی برای برهمکنش سطحی میان ذرات باطله و مواد سطح ساز در نظر گرفته شد. سپس نمونه درون ارلن روی پارچه فیلتر ریخته شد و فشار خلا بر اساس

(۱) Besra

(۲) Patra

شرایط فرایندی کارخانه معادل ۲ بار به سیستم اعمال شد و آزمایش به مدت ۲ دقیقه انجام شد. آنگاه مقدار آب بازیابی شده از سیستم اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب تعیین می‌شود به ازای مقدار فشار خلا مشخص چه مقدار آب بازیابی شده است. مقدار رطوبت محتوای کیک فیلتر با روش خشک کردن و تجزیه وزنی محاسبه شد. همچنین در این آزمایش‌ها تاثیر سطح‌سازهای مورد استفاده در این پژوهش در نرخ‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ گرم بر تن مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایش ته‌نشینی کلاسیک

آزمایش‌های ته‌نشینی کلاسیک با هدف ارزیابی رفتار ته‌نشینی و انتخاب مواد شیمیایی (مانند فلوکولانت) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش دوغاب با غلظت جامد ۱۲ درصد مطابق با شرایط عملیاتی کارخانه و شرایط استاندارد ته‌نشینی آزاد برای آزمایش‌های ته‌نشینی در نظر گرفته شد. دوغاب درون استوانه ۵۰۰ سی‌سی آماده‌سازی شده و زمان ۵ دقیقه برای انجام واکنش‌های سطحی در نظر گرفته شد. آنگاه استوانه مدرج چندین مرتبه معکوس شد تا محتوای آن کاملا همگن شود. بمنظور استفاده از مواد شیمیایی، فلوکولانت A26 از نوع آنیونی ساخته شده توسط شرکت اصفهان کوپلیمر استفاده شد. محلول فلوکولانت به کمک آب تازه (جریان آبی که برای اولین بار در فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرد و بازیابی شده نیست) با غلظت جامد یک دهم درصد به مدت یک ساعت آماده‌سازی شد. سپس سطح‌سازهای مد نظر درون یک بشر بطور همزمان آماده‌سازی شد. آنگاه با اضافه شدن مواد شیمیایی استوانه سه مرتبه معکوس شد و روی میز قرار می‌گیرد و آزمایش آغاز می‌شود. در آزمایش‌های ته‌نشینی مقدار فلوکولانت و سطح‌ساز بر اساس شرایط بهینه‌سازی شده فلوکولانت در کارخانه که ۳۰ گرم بر تن باطله ورودی به تیکنرها می‌باشد و بر اساس نمونه‌های ۲۵۰ گرم جامد محتوای دوغاب ۱۲ درصدی درون استوانه مدرج آزمایش‌ها محاسبه می‌گردد. هر دو ماده شیمیایی با نسبت برابر توزین شده و با مقدار آب کافی برای ساخت دوغاب ۱۲ درصد با محتوای ۲۵۰ گرم جامد ذرات باطله محلول‌سازی شده و مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایش های پتانسیل زتا

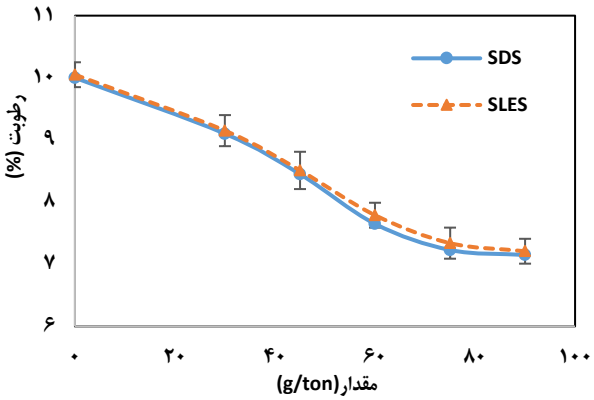
همانطور که گفته شد، پتانسیل زتا (Zeta potential) شاخصی است که برای اندازه‌گیری وضعیت بار سطحی ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور از دستگاه اندازه‌گیری پتانسیل زتا مدل ZEN3600 استفاده شد. به منظور انجام این آزمایش، نمونه ذرات باطله فراوری سنگ آهن با ترکیب کانی شناسی بر اساس بیشترین درصد فراوانی در ذرات باطله آهن به ترتیب $TiO_2 < CaO < MgO < Al_2O_3 < SiO_2$ می باشد، در ظرف‌های جداگانه بصورت دوغاب با pH معادل با آب فرایند، حدود ۸٫۳ آماده‌سازی شد. سپس مقادیر مختلف سطح‌ساز به ظروف حاوی دوغاب اضافه شد و همزنی به مدت ده دقیقه انجام شد. نهایتا ذرات جامد ته‌نشین شده و آب باقیمانده برای اندازه‌گیری پتانسیل زتا توسط دستگاه مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایش آنالیز شکل قطره

آبرانی یکی از نیروهای اصلی است که می‌تواند موجب تغییر قابلیت تراکم‌پذیری و فیلترشوندگی دوغاب‌های معدنی شود. برای بررسی تاثیر این دو سطح‌ساز بر آبرانی از آنالیز شکل قطره استفاده شد تا بطور غیرمستقیم تغییرات زاویه تماس ارزیابی شود. بدین منظور از دستگاه آنالیز شکل قطره مدل DSA100 موجود در آزمایشگاه دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد. روش کار بدین صورت است که یک قطره آب روی سطح نمونه قرار می‌گیرد و تصویر آن ثبت می‌شود. سپس با روش‌های آنالیز تصویری زاویه تماس توسط دستگاه محاسبه خواهد شد. در اینجا چالشی که وجود داشت این بود که نمونه مد نظر باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا امکان قرارگیری یک قطره روی آن فراهم باشد. حال آنکه ابعاد ذرات باطله فراوری سنگ آهن کمتر از ۱۰۰ میکرون بود. برای حل این مساله از یک روش غیر مستقیم استفاده شد بدین ترتیب که مقداری نمونه جامد مطابق با روش مورد استفاده در دستگاه XRD تحت فشار ۱۵۰ کیلونیوتون بصورت قرص تولید شد و سطح آن صیقل داده شد. در این شرایط سطح یکپارچه‌ای بوجود می‌آید که امکان قرارگیری یک قطره روی آن وجود داشت. با توجه به اینکه در اینجا از روش غیر مستقیم استفاده شد، زاویه تماس مورد استناد قرار نگرفت و تنها تصویر قطره روی سطح ارزیابی شد.

آزمایش طیف‌بینی فروسرخ

یکی از روش‌هایی که می‌توان با استفاده از آن حضور و تشکیل پیوند ماده شیمیایی سطح‌ساز را در سطح ذرات تایید نمود، آزمایش طیف بینی فروسرخ (FT-IR) است. در این پژوهش از دستگاه طیف بینی فروسرخ مدل FT/IR-4600 استفاده شد. بدین منظور دو نمونه دوغاب ذرات باطله با غلظت جامد یکسان که یکی حاوی ۱۰۰ گرم بر تن سطح ساز سدیم دو دسیل سولفات و نمونه دیگر بدون سطح‌ساز، تهیه شد. سپس مقداری از هر کدام روی قرص KBr در یک خشک‌کن قرار داده شد تا رطوبت‌زدایی شود. در نهایت دو قرص KBr محتوای ذرات باطله فراوری سنگ آهن در دستگاه طیف بینی مورد آزمون قرار گرفت.



شکل ۲ - تاثیر نرخ مصرف سطح سطح ساز بر رطوبت نهایی آزمایش فیلتراسیون

آزمایش TG-DTA

این آزمایش ترکیبی از دو آزمایش متفاوت ترموگراویمتری TG و آنالیز حرارتی تفاضلی DTA است. این آزمایش برای ارزیابی تغییر رفتار نمونه در اثر مواجهه با حرارت بمنظور اطمینان از جذب سطحی استفاده شد. در این پژوهش از دستگاه STA مدل 409 PC Luxx ساخت کشور آلمان استفاده شد. بدین منظور یک نمونه دوغاب ذرات باطله با ۱۰ دقیقه همزنی در حضور سطح ساز SDS آماده‌سازی شد. بخشی از نمونه مد نظر درون سلول دستگاه گرفت و آنالیز انجام شد. بر اساس تصویر مشاهده شده از طیف بینی در این آنالیز پیک‌های جذبی مشاهده گردید.

ارائه یافته ها و تحلیل نتایج

آزمایش‌های فیلتراسیون

بمنظور ارزیابی قابلیت فیلترشوندگی در مقادیر مختلف سطح‌ساز، آزمایش‌های فیلتراسیون نمونه باطله فراوری سنگ آهن در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. شکل ۲ تاثیر نرخ مصرف سطح‌ساز بر رطوبت نهایی کیک آزمایش فیلتراسیون را نشان می‌دهد.

بررسی شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ مصرف هر دو سطح‌ساز، رطوبت کیک باطله فراوری سنگ آهن کاهش یافته است. به عبارت دیگر با استفاده از این دو سطح‌ساز تا نرخ مصرف ۹۰ گرم بر تن رطوبت نهایی حدود ۳ درصد کاهش یافته است. این درحالیست که بدون حضور سطح‌ساز رطوبت کیک حدود ۱۰ درصد بود. بدیهی است که مقدار بهینه سطح‌ساز به قیمت آب و ماده شیمیایی وابسته است. با توجه به ظرفیت بالای کارخانه‌های فراوری منطقه گل‌گهر و اینکه در حال حاضر آب تازه مصرفی در این منطقه از خلیج فارس تامین می‌شود و هزینه قابل توجهی دارد، این میزان بهبود در رطوبت نهایی کیک فیلتر ارزش اقتصادی قابل توجهی دارد.

علاوه بر آن کاهش رطوبت کیک فیلتر شرایط مساعد و امیدبخشی برای استفاده از روش‌های پیشرفته انباشت باطله را فراهم می‌کند. قابل ذکر است که برای اطمینان از نتایج، این آزمایش دوباره تکرار شد و نتایج آن کاملا مشابه با شکل ۲ بود. این نتایج زمینه امیدبخشی برای استفاده از این سطح‌سازها در تیکنرهایی که از عمق بستر قابل توجه استفاده می‌کنند (مانند تیکنر خمیری) نیز فراهم می‌کند. همچنین در این آزمایش نشان داده شد که نتایج دو سطح‌ساز تقریبا مشابه بود و نتایج سطح‌ساز SDS نسبت به SLES بطور ناچیزی بهتر بود. البته شباهت رفتار این دو با توجه به شباهت چشمگیر ساختار شیمیایی دو سطح‌ساز قابل پیش‌بینی بود. با تکرار آزمایش‌ها نشان داده شد بازه نوسان نتایج بسیار محدود است و بدین ترتیب می‌توان گفت روند نزولی بدست آمده معنی‌دار است.

بررسی دقیق‌تر شکل ۲ نشان می‌دهد که در نرخ‌های مصرف بیش از ۷۵ گرم بر تن، روند کاهش رطوبت کاهش یافته و ثابت شد. دلیل این مساله این است که با کاهش رطوبت از ۱۰ تا ۷ درصد، ذرات جامد بیش از پیش به هم نزدیک می‌شوند و تعادل نیروهای بین ذرات تغییر می‌کند. زمانیکه ذرات به هم نزدیک‌تر می‌شوند، نیروی واندروالس افزایش می‌یابد و غالب می‌شود. بدین ترتیب با غالب شدن نیروی واندروالس قابلیت تراکم دوغاب نسبت به قبل کاهش یافته و نرخ بهبود آبگیری و فیلتراسیون با افزایش سطح‌ساز متوقف می‌شود.

آزمایش‌های ته‌نشینی

در بخش قبل نشان داده شد که حضور این سطح‌سازها می‌تواند موجب بهبود قابلیت فیلتراسیون دوغاب باطله فراوری سنگ آهن شود. در اغلب فرایندهای آبگیری مانند تیکنرها و فیلترها، با هدف بهبود راندمان و ظرفیت فرایند از فلوکولانت (Flocculant) استفاده می‌شود[۱۷]. در برخی صنایع معدنی که از مدار تیکنر و فیلتر استفاده می‌کنند، فلوکولانت در تیکنرها استفاده می‌شود اما اثر آن در مرحله فیلتراسیون نیز باقی می‌ماند. حال در اینجا این سوال مطرح است که آیا بین این سطح‌سازها و فلوکولانت تاثیر متقابل وجود دارد یا نه؟ به عبارت دیگر آیا در حضور این سطح‌سازها عملکرد فلوکولانت تحت تاثیر قرار می‌گیرد بطوریکه سرعت ته‌نشینی کاهش یافته و مصرف آن افزایش یابد یا نه؟ به این مساله از منظر علمی تاثیر همزمان مواد شیمیایی (Synergistic effect) گفته می‌شود. بمنظور بررسی این مساله آزمایش‌های ته‌نشینی کلاسیک انجام شد. در جدول ۱ سرعت ته‌نشینی حاصل از آزمایش‌های ته‌نشینی در حضور فلوکولانت و سطح‌ساز نمایش داده شده است.

جدول ۱- سرعت ته‌نشینی اولیه بدست آمده از آزمایش‌های ته‌نشینی مختلف با حضور فلوکولانت و سطح‌ساز

مواد شیمیایی مورد استفاده	سرعت ته نشینی (cm/s)
فلوکولانت	۲٫۲
فلوکولانت+SDS	۱۱٫۷
فلوکولانت+SLES	۱۰٫۶

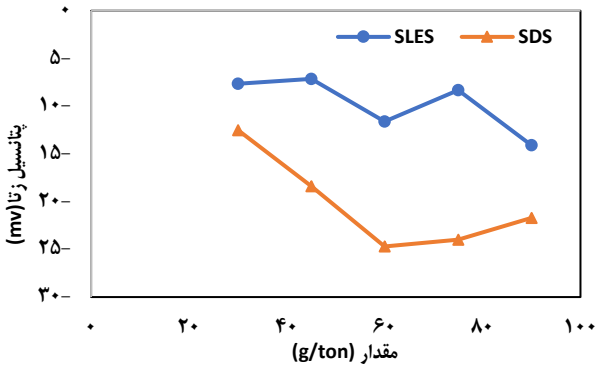
بررسی جدول ۱ نشان می‌دهد که در حضور سطح‌سازها سرعت اولیه ته‌نشینی نسبت به شرایط بدون سطح‌ساز بطور قابل توجهی افزایش یافته بطوریکه به حدود ۵ برابر رسیده است. دلیل احتمالی این مساله می‌تواند به تاثیر سطح‌ساز بر مکانیسم جذب فلوکولانت و نتیجتا افزایش راندمان فلوکولانت مربوط می‌شود. از اینرو می‌توان گفت استفاده همزمان از این سطح‌سازها در کنار فلوکولانت در عمل می‌تواند موجب بهبود عملکرد فلوکولانت شود[۱۳]. برای اطمینان از نتایج، این آزمایش توسط فلوکولانت دیگری از همان خانواده نیز انجام شد و نتایج کاملا مشابهی بدست آمد. از اینرو می‌توان گفت از منظر اجرایی استفاده از این سطح‌سازها علاوه بر بهبود تراکم‌پذیری در فیلترها، می‌تواند با هدف کاهش مصرف فلوکولانت نیز مورد استفاده قرار گیرد.

تا اینجا گفته شد که استفاده از سطح‌سازهای ذکر شده می‌تواند موجب بهبود قابلیت تراکم‌پذیری و فیلترشوندگی شود. همچنین در حضور این سطح‌سازها راندمان عملکرد فلوکولانت نیز افزایش یافت که این مساله می‌تواند موجب کاهش مصرف فلوکولانت شود. حال سوالی که مطرح است این است که این سطح‌سازها چگونه عمل می‌کنند و چگونه موجب بهبود قابلیت تراکم‌پذیری و فیلترشوندگی می‌شوند. همچنین این سوال مطرح است که آیا واقعا واکنش بین ذرات و سطح‌سازها رخ می‌دهد یا نه؟ در بخش‌های پیش رو این موارد مورد بحث قرار خواهد گرفت.

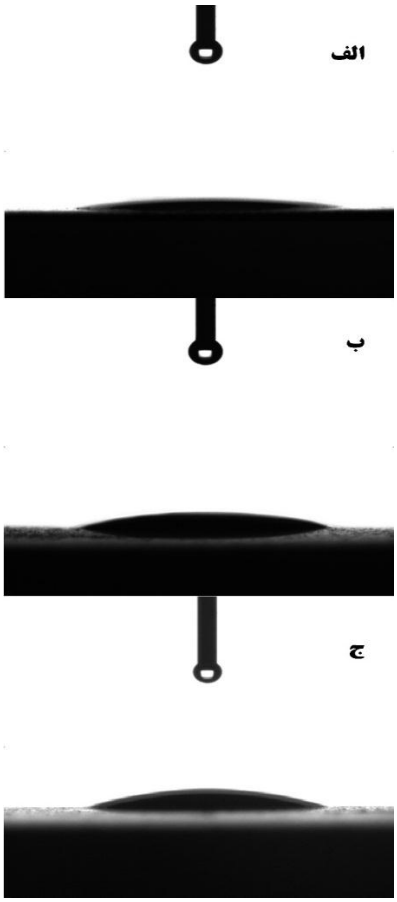
آزمایش‌های پتانسیل زتا

شکل ۳ تاثیر نرخ مصرف سطح‌سازهای مورد استفاده در این پژوهش بر پتانسیل زتا را نشان می‌دهد.

بررسی شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ مصرف هر دو سطح‌ساز، پتانسیل زتا کاهش یافته و به مقادیر منفی‌تر نزدیک شده است. به عبارت دیگر در حضور سطح‌سازها نیروی دافعه بین ذرات باطله فراوری سنگ آهن غالب شده است. در نتیجه غالب شدن نیروی دافعه، تراکم‌پذیری و قابلیت فیلتراسیون بهبود می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت یکی از مکانیسم‌های عملکرد این دو سطح‌ساز در راستای بهبود قابلیت فیلتراسیون، ایجاد نیروی دافعه بین ذرات ناشی از تغییر پتانسیل زتا است.



شکل ۳ - تاثیر نرخ مصرف سطح‌سازها بر پتانسیل زتا



شکل ۴ - تصاویر حاصل از شکل قطره در شرایط مختلف سطح ساز، الف- عدم حضور سطح‌ساز، ب- در حضور سدیم دو دسیل سولفات، ج- در حضور سدیم لوریل اتر سولفات

آزمایش اندازه‌گیری شکل قطره

همانطور که در بخش مواد و روش کار گفته شد، در این پژوهش از روش غیر مستقیم آنالیز شکل قطره برای ارزیابی آبرانی استفاده شد. شکل ۴ تصایر زاویه شکل قطره در عدم حضور سطح سازها و در حضور آنها را نشان می‌دهد.

بررسی تصاویر شکل ۴ نشان می‌دهد که در حضور دو سطح‌ساز مورد استفاده در این پژوهش، سطح ذرات آبران‌تر شده و قطره به راحتی روی سطح پخش نمی‌شود. این مساله نشان می‌دهد این دو سطح‌ساز با ایجاد آبرانی موجب غالب شدن نیروی دافعه و بهبود قابلیت تراکم‌پذیری دوغاب باطله فراوری سنگ آهن می‌شوند. بنابراین از نتایج این بخش و بخش قبل می‌توان گفت این دو سطح‌ساز با کمک تغییر پتانسیل زتا و آبرانی موجب بهبود راندمان تراکم‌پذیری و فیلتراسیون می‌شوند. با توجه به رفتار مشاهده شده از این دو سطح‌ساز و بر مبنای تجارب و پژوهش‌های گذشته[۹] ، انتظار می‌رود در حضور این سطح‌سازها ترک‌های درون کیک فیلتر نیز کاهش یابد. بدین ترتیب می‌توان گفت نه تنها با بهبود تراکم‌پذیری بلکه به کمک کاهش ترک‌ها راندمان فیلتراسیون بهبود یابد.

حال در اینجا مساله‌ای که وجود دارد این است که این سطح‌سازها چگونه با سطح ذرات واکنش می‌دهند. در بخش‌های پیش رو نحوه اتصال سطح‌ساز و سطح ذرات از منظر نوع پیوند بررسی شده است.

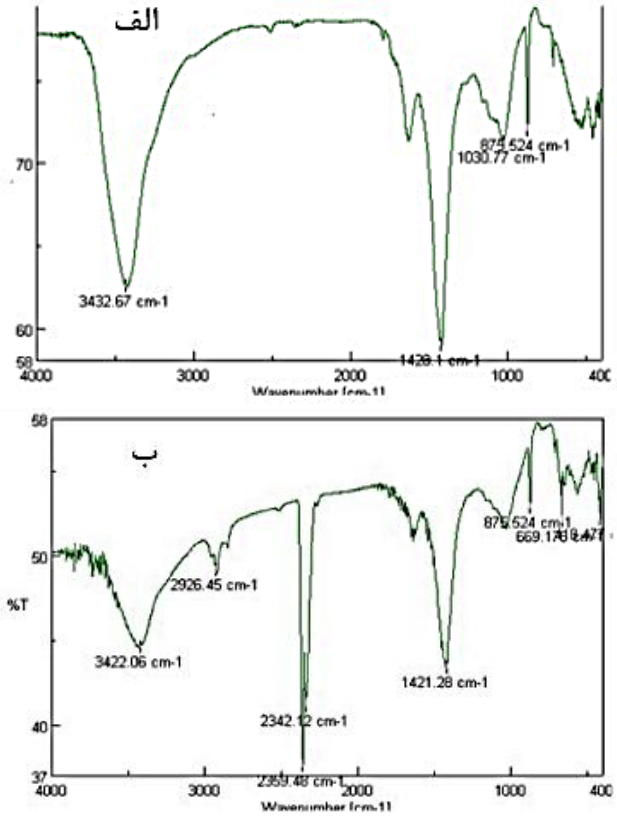
طیف فروسرخ

بمنظور ارزیابی جذب سطح‌سازها در سطح ذرات جامد، قبل و بعد از واکنش بین ذرات و سطح‌ساز (SDS) آنالیز طیف فروسرخ FTIR انجام شد. شکل ۵ نتایج آزمایش طیف فروسرخ را نشان می‌دهد.

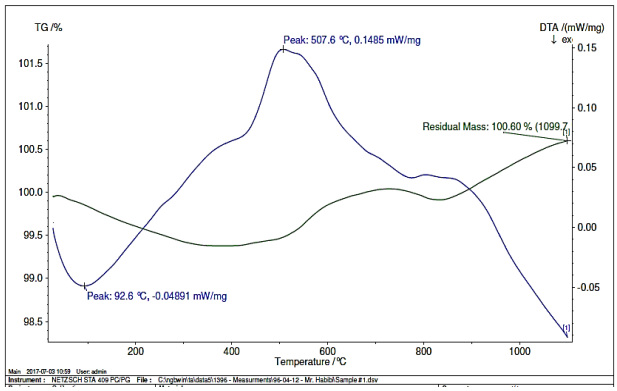
بررسی شکل ۵ و مقایسه طیف مادون‌قرمز ذرات در حضور و بدون حضور سطح‌ساز نشان می‌دهد در طیف نمونه‌های دوغاب با محتوای ماده شیمیایی سطح‌ساز دارای پیک‌های جذبی می‌باشند که این پیک‌ها در طیف‌های نمونه‌های دوغاب فاقد ماده شیمیایی سطح‌ساز وجود ندارد. نتایج حاصل از بررسی پیک‌ها نشان داد طول موج‌های جذبی این پیک‌ها در پیوندهای بین اتمی می‌باشد که این پیوندها در ساختار مولکولی سطح‌ساز سدیم دو دسیل سولفات وجود دارد. پیک موجود در ناحیه ۱۴۲۱,۲۸ مربوط به ارتعاش کشش نامتقارن پیوند دوگانه S=O است و این پیوند در ساختار مولکولی سطح ساز وجود دارد. پیک موجود در ناحیه ۲۹۲۶,۴۵ مربوط به ارتعاشات کششی CH_2 موجود در ساختار SDS است[۱۶]. بنابراین می‌توان گفت جذب سطح ساز روی سطح ذرات صورت گرفته است.

آنالیز TG-DTA ماده شیمیایی سطح‌ساز

آزمایش TG-DTA نیز با هدف تایید اتصال سطح‌ساز با سطح ذرات باطله آهن انجام شده است. شکل ۶ نتایج آزمایش TG را نشان می‌دهد.



شکل ۵ – تصاویر حاصل از طیف بینی فروسرخ ذرات باطله آهن، (الف) عدم حضور سطح‌ساز SDS، (ب) در حضور سطح‌ساز SDS



شکل ۶ – نتیجه آزمایش TG-DTA جذب سطح‌ساز SDS

بر اساس شکل ۶، پیک موجود در ناحیه ۹۲/۶ درجه سلسیوس مربوط به از دست دادن آب در سطح‌ساز SDS است. عدم وجود پیک واضح در ناحیه ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس نشان‌دهنده پوشش دهی روی سطح ذرات باطله فراوری سنگ آهن است. با توجه به اینکه جرم باقیمانده در انتهای نمودار کاهش نداشته است، نشان‌دهنده این است که مقدار ماده فعال کننده سطح بسیار ناچیز است اما در محتوای رطوبت کیک بسیار مؤثر است.

نتیجه گیری

در این پژوهش نقش دو سطح‌ساز آنیونی با نام‌های سدیم دو دسیل سولفات (SDS) و سدیم لوریل اتر سولفات (SLES) بر بهبود تراکم‌پذیری دوغاب باطله فراوری سنگ آهن بررسی شده است. بدین منظور ابتدا آزمایش‌های قیف بوخنر انجام شد و ملاحظه شد در حضور این دو سطح‌ساز قابلیت تراکم و فیلترشوندگی بهبود یافت بطوریکه رطوبت کیک حدود ۳ درصد کاهش یافت. سپس با هدف تاثیر متقابل بین سطح‌سازها و فلوکولانت آزمایش‌های ته‌نشینی انجام شد. نتایج نشان داد در حضور سطح‌ساز کارایی فلوکولانت بطور چشمگیری بهبود می‌یابد. همچنین به منظور ارزیابی مکانیسم عملکرد این دو سطح‌ساز آزمایش‌های اندازه گیری پتانسیل زتا و شکل قطره انجام شد. ملاحظه شد در حضور این دو سطح‌ساز پتانسیل زتا کاهش یافته و به مقادیر منفی‌تر نزدیک شد. همچنین ملاحظه شد که این دو سطح‌ساز می‌تواند موجب آبرانی سطح ذرات باطله فراوری سنگ آهن شود. بدین ترتیب می‌توان گفت این دو سطح‌ساز با تغییر نیروهای بین ذرات مانند آبرانی می‌توانند موجب بهبود تراکم‌پذیری و فیلترشوندگی دوغاب باطله فراوری سنگ آهن شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از کلیه حمایت‌های شرکت صنعتی معدنی گل گهر در این پروژه نهایت تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از مدیریت محترم پژوهشکده سنگ آهن و فولاد، معاونت محترم بهره‌برداری و مدیریت کارخانجات پرعیارسازی به خاطر همکاری صمیمانه در انجام این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

مراجع

[1] Gálvez ED., Cruz R., Robles PA., Cisternas LA., Optimization of Dewatering Systems for Mineral processing. *Miner Eng.* **63:** 110-117 (2014).

[2] Boger D.V., Rheology and the Resource Industries. *Chem. Eng. Sci.* 64(22): 4525-4536 (2009).

[3] Jewell R.J., Fourie A.B., Paste and Thickened Tailings–A Guide (Third edition), Australian Centre for Geomechanics.

[4] Stickland A.D., A Compressional Rheology Model of Fluctuating feed Concentration During Filtration of Compressible Suspensions. *Chem. Eng. Sci.* **75:** 209-219 (2012).

[5] Garmsiri M.R., Haji Amin Shirazi H., The Effect of Suspension Properties on Shear Yield Stress and Compressibility of the Suspension of Copper Flotation Tailings, *Appl. Rheol.* **28(1):** 15721 (2018).

[6] Garmsiri M.R., Haji Amin Shirazi H., An analysis of the influence of cylinder dimension ratio and Lifting Velocity on the Slump Test Results. *Appl. Rheol.* **25:** 23416 (2018).

[7] Addai-Mensah J., Prestidge C.A., Structure Formation in Dispersed Systems, in: *Coagulation and Flocculation*, (eds: H Stechemesser, B Dobias), Taylor and Francis (2005).

[8] Green M.D., Boger, D.V., Yielding of Suspension in Compression, *Ind. & Eng. Chem. Res.* **36:** 4984-4992 (1997).

[9] Johnson B.J., Franks G.V., Scales P.J., Boger D.V., Healy TW., Surface Chemistry–Rheology Relationships in Concentrated Mineral Suspensions. *Int. J. Miner. Process.* **58:** 267–304 (2000).

[10] Liu L., Wu F., Tan W., Effect of Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide on Shrinkage Cracks in filter Cakes During Pressure Filtration of Iron ore Concentrates, *Powder Technol.* **297:** 239-246 (2016).

[11] Patra A.S., Makhija D., Mukherjee A.K., Tiwari R., Sahoo C.R., Mohanty B.D., Improved Dewatering of Iron ore Fines by the Use of Surfactants, *Powder Technol.* **287:** 43–50 (2016).

[12] Besra L., Sengupta D.K., Roy S.K., Ay P., Influence of Surfactants on Flocculation and Dewatering of Kaolin Suspensions by Cationic Polyacrylamide (PAM-C) Flocculant, *Sep. Purif. Technol.* **30:** 251-264 (2003).

[13] Ejtemaei M., Ramli S., Osborne D., Nguyen A.V., Synergistic Effects of Surfactant-Flocculant Mixtures on Ultrafine Coal Dewatering and Their Linkage with Interfacial Chemistry, *J. Clean. Produc.* **232:** 953-965 (2019).

[۱۴] آذرگون جهرمی ا.، نادری ح.، قره داغی م.، افزایش کارایی فیلتر خلاء نواری مجتمع معدنی گلگهر با استفاده از پارامترهای فرآیندی، *مجله مهندسی منابع معدنی*، **۵(۲):** ۱۳۹-۱۱۹ (۱۳۹۹).

[15] Mamghaderi H., Aghababaei S., Gharabaghi M., Noaparast M., Albijanic B., Rezaei A., Investigation on the Effects of Chemical Pretreatment on the Iron Ore Tailing Dewatering. *Colloids and Surf. A. Physicochem. and Eng. Asp*. **625:** 126855 (2021).

[16] Zeng H., Tang H., Sun W., Wang L., Deep Dewatering of Bauxite Residue Via the Synergy of Surfactant, Coagulant, and Flocculant: Effect of Surfactants on Dewatering and Settling Properties. *Sep. Purif. Technol.* **302:** 122110 (2023).

[17] Garmsiri M.R., Haji Amin Shirazi H., The Effect of Grain Size on Flocculant Preparation, *Minerals Eng.* **65:** 51-53 (2014).

[18] Sharma G., Naushad M., Thakur B., Kumar A., Negi P., Saini R., Chahal A., Kumar A., Stadler FJ,. Aqil UMH., Sodium Dodecyl Sulphate-Supported Nanocomposite as Drug Carrier System for Controlled Delivery of Ondansetron. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* **15(3):** 414 (2018).