نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دوره پنجم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۱۹ تا ۱۳۹
Vol. 5, No. 2, Summer 2020, pp. 119-139

DOI: 10.30479/jmre.2019.11194.1290

افزایش کارایی فیلتر خلاء نواری مجتمع معدنی گل‌گهر با استفاده از پارامترهای فرآیندی

احمد آذرگون جهرمی[۱]، حجت نادری[۲*]، محمد قره داغی[۳]

۱- کارشناسی ارشد، فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد
۲- استادیار، فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد
۳- کارشناسی ارشد، فرآوری مواد معدنی، شرکت معدنی و صنعتی گل گهر، سیرجان، کرمان

(دریافت ۱۳۹۸/۰٤/۲۷، پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۱۰)

چکیده

در خطوط ۵ و۶ شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، عملیات افزایش سطح ویژه کنسانتره(بلین) توسط آسیای غلتکی فشار بالا (HPGR)، واقع در انتهای خط انجام می‌شود. خوراک ورودی این دستگاه، کنسانتره مگنتیت است که بعد از عملیات فیلتراسیون، به‌صورت کیک فیلتر وارد تجهیز می‌شود. در حال حاضر به‌دلیل تغییر در خوراک ورودی مدار، رطوبت کنسانتره افزایش یافته و رطوبت بالای آن، موجب کاهش فاصله عملیاتی بین غلتک‌های آسیای غلتکی فشاربالا و در نتیجه، کاهش نرخ خوراک‌پذیری و کاهش فشار موثر وارده از جانب غلتک‌ها به ذرات شده است. در نتیجه سطح ویژه مطلوب، قابل دستیابی نیست. بازرسی فرایند، نشان‌داد که معیارهای فشار پمپ خلا، زمان آب‌گیری، اندازه ذرات جامد و درصد جامد پالپ، بر فرایند فیلترشوندگی موثر هستند. به‌این منظور آزمایش‌های فیلتراسیون در سطوح مختلف هر یک از شاخص‌های مذکور انجام شد. همچنین در این تحقیق اثر چهار نوع سورفکتانت سدیم شامل دودسیل سولفات (SDS)، پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰۰ (PEG)، سیتیل تری‌میتل آمونیوم برمید (CTAB) و سدیم لوریل اتر سولفات (SLES)، بر کاهش رطوبت کیک فیلتر بررسی شد. نتایج نشان داد فشار خلاء عملیاتی بهینه ۶۰ کیلوپاسکال، زمان آب‌گیری بهینه برای دستیابی به کمترین رطوبت و بیشترین توان عملیاتی ۱۲۰ ثانیه، اندازه ذرات باتوجه به تجهیزات جدایش ابعادی، ۱۰۵ میکرون و همچنین درصدجامد باتوجه به تجهیزات انتقال پالپ، مقدار ۶۰٪ مناسب است. آزمایشهای سطح‌سازها نشان داد باافزودن ۱۰۰ گرم‌برتن سطح‌ساز سدیم دودسیل سولفات (SDS) به پالپ، رطوبت کیک فیلتر، ۲٪ کاهش یافت. SDS با کاهش زمان تشکیل کیک فیلتر و افزایش حجم فیلتریت در زمان تشکیل کیک، باعث افزایش کارایی عملیات فیلتراسیون شد. همچنین باعث بهبود عملکرد فیلتراسیون به‌وسیله افزایش نسبت توان عملیاتی به رطوبت شد. در غلظت ۱۰۰ گرم‌برتن SDS، کیک فیلتر دارای کمترین رطوبت و عملیات فیلتراسیون دارای بیشترین توان عملیاتی نسبت به سایر سطح‌سازها شد. با افزودن ۷۵ گرم‌برتن سدیم لوریل اتر سولفات اتوکسیله(SLES)، رطوبت کیک فیلتر به میزان ۲٪ کاهش یافت و به دلیل عملکرد بهتر نسبت به SDS ، ارزان‌تر و در دسترس‌بودن، به‌عنوان کمک‌فیلتر نهایی انتخاب شد.

کلمات کلیدی

فیلتر نواری خلا، کیک فیلتر، سطح‌ساز، بلین، فیلتراسیون.

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: Naderi@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

معدن سنگ آهن گل‌گهر سیرجان واقع در استان کرمان، یکی از ذخایر عظیم سنگ آهن در خاورمیانه است. خطوط فراوری این معدن شامل ۷ خط تولید کنسانتره سنگ آهن و سه خط واحد بازیابی هماتیت است. خطوط ۵، ۶ و ۷ با طراحی کاملا مشابه و با هدف تولید سالانه ۶ میلیون تن کنسانتره برای تامین خوراک واحد گندله‌سازی شماره ۲ احداث شده‌اند.

فرآیند فراوری سنگ آهن در این خطوط شامل مراحل پیش‌خردایش و خردایش با آسیای غلتکی فشار بالا (HPGR) و آسیای گلوله‌ای، جدایش فیزیکی و ابعادی توسط هیدروسیکلون، پرعیارسازی مغناطیسی توسط جداکننده‌های مغناطیسی شدت متوسط و پایین و همچنین سولفورزدایی با سلول‌های فلوتاسیون است. عملیات آبگیری از کنسانتره مگنتیت در این خطوط، توسط ۳ فیلتر نواری خلا و آبگیری از باطله، توسط تیکنر انجام می‌شود. در نهایت افزایش سطح ویژه(بلین) کنسانتره مگنتیت، توسط آسیای غلتکی فشاربالا صورت می‌گیرد.

۱-۱- ضرورت تحقیق

برای افزایش بلین کنسانتره مگنتیت از دستگاه آسیای غلطتکی فشاربالا در انتهای خط استفاده می‌شود. با توجه به سازوکار فشرده‌سازی مواد در آسیای غلتکی فشاربالا، ذرات عبوری از بین غلتک‌ها از همه جهت‌ها تحت فشار قرار گرفته و خرد می‌شوند. خوراک ورودی این فرآیند، کنسانتره مگنتیت است که بعد از عملیات فیلتراسیون به‌صورت کیک فیلتر وارد دستگاه می‌شود.

ضریب اشباع شوندگی خوراک ورودی، یکی از معیارهای اساسی در عملکرد آسیای غلتکی فشاربالا است. در حقیقت این شاخص، رطوبت مناسب برای بخش افزایش بلین را تعیین و مشخص می‌کند در چه رطوبتی، فشار وارده به مواد به‌دلیل وجود حالت الاستیکی موجب افزایش عدد بلین نمی‌شود. افزایش رطوبت خوراک آسیای غلطتکی فشاربالا، نقطه فشار گسسته‌شدن مواد را کاهش می‌دهد. ازطرفی، ضریب اشباع‌شوندگی، تعیین‌کننده نرخ خوراک‌پذیری ویژه و نهایتا، ظرفیت آسیای غلتکی فشاربالا است زیرا شاخص اشباع‌شوندگی پایین، موجب فرار مواد از فاصله بین غلتک‌ها در صورت اعمال نیرو خواهد شد. در این حالت برای کنترل نرخ خوراک ورودی، سرعت حرکت غلتک‌ها در آسیا افزایش می‌یابد. اما لازم است این افزایش سرعت همراه با افزایش نیروی فشاری ویژه باشد. اگرچه این افزایش نیرو از یک‌سو باعث خردایش بیشتر مواد می‌شود ولی ازطرف‌دیگر، کاهش فاصله کاری غلتک‌های آسیای مذکور و در نهایت، کاهش نرخ خوراک‌پذیری را به همراه دارد. با ادامه‌یافتن این روند یعنی افزایش هم‌زمان رطوبت و نیروی فشاری ویژه، میزان فاصله کاری بین غلتک‌ها به‌شدت کاهش می‌یابد؛ به‌عبارتی در صورت افزایش رطوبت، امکان دستیابی به فشار بالاتر میسر نخواهد بود زیرا با افزایش بیشتر رطوبت خوراک، فاصله کاری ایجادشده بین غلتک‌ها کمتر و کمتر شده و موجب آسیب‌دیدن و ساییده‌شدن غلتک‌ها می‌شود. درنتیجه افزایش فشار تاثیر محسوسی بر ریزدانه‌شدن محصول خروجی آسیای غلطتکی فشاربالا ندارد و تنها موجب افزایش سایش غلتک‌ها می‌شود. بنابراین مجددا افزایش رطوبت موجب کاهش فاصله کاری دستگاه و در نتیجه موجب کاهش نرخ خوراک پذیری آسیای غلطتکی فشاربالا می‌شود. به‌طور کلی اگر شرایط رطوبت یکسان باشد، در صورت به‌کارگیری آسیای غلتکی فشاربالا، مواد دارای شاخص اشباع‌شوندگی بالاتر نسبت به مواد دارای اشباع شوندگی پایین‌تر، ظرفیت خوراک‌پذیری و عدد بلین بالاتری خواهند داشت[۱].

بنابراین تنها راه ممکن برای افزایش بلین، کاهش رطوبت خوراک ورودی به آسیای غلتکی فشاربالا است. هدف از این تحقیق، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی فیلتر نواری خلاء خط ۵ تولید کنسانتره و امکان‌سنجی استفاده از سطح‌سازها به‌عنوان کمک فیلتر در فرایند فیلتراسیون با هدف کاهش رطوبت کنسانتره است. به‌این منظور ابتدا عوامل موثر بر فیلتراسیون کنسانتره مگنتیت خط ۵ بررسی و تعیین شد، سپس حدود بهینه آنها برای دستیابی به کمترین مقدار رطوبت به‌دست آمد. در ادامه از سطح‌سازهای مختلف با غلظت‌های متفاوت برای انتخاب گزینه مناسب استفاده شد. در نهایت سطح‌ساز مناسب و غلظت بهینه برای دست‌یابی به کمترین رطوبت و بیشترین توان عملیاتی، انتخاب شد.

۱-۲- تئوری فیلتراسیون

فیلتر از سطح متخلخلی که منافذ آن برای عبور مایع مناسب بوده، ولی از عبور دانه‌های جامد جلوگیری می‌کند، تشکیل شده‌است. عبور مایع از سطح فیلتر در اثر ایجاد اختلاف فشار در دو طرف آن انجام می‌شود. مواد به صورت پالپ از سمتی که فشار بیشتر است با سطح فیلتر در تماس قرار می‌گیرند، در نهایت آب موجود در پالپ از منافذ این سطوح

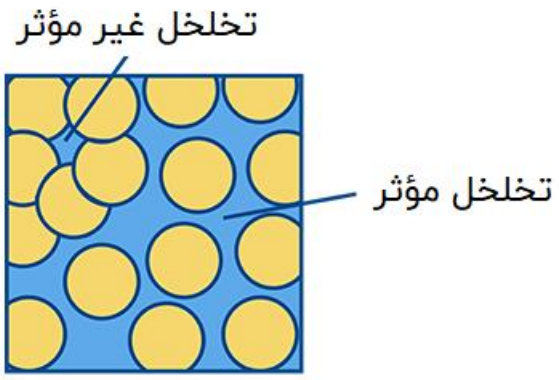
عبور می‌کند و دانه‌های جامد به‌شکل کیک بر روی آن باقی می‌ماند. اختلاف فشار ممکن است ناشی از وزن پالپ موجود بر روی سطح فیلتر، ایجاد فشار اضافی بر روی سطح فیلتر، کاهش فشار در سمت دیگر فیلتر و نیروی گریز از مرکز به‌وجود آید[۲]. یکی از روش‌های عمده آب‌گیری در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، استفاده از فیلترهای خلاء است. این نوع فیلترها در انواع دیسکی، استوانه‌ای، نواری و غیره وجود دارند که بسته به‌نوع ماده معدنی و دیگر ویژگی‌های فرآیندی و عملیاتی موثر بر فیلترشوندگی محصول مورد نظر، طراحی و به‌کار برده می‌شوند. فیلتر نواری خلاء، یک‌سری تسمه‌های پیوسته هستند و از فولاد ضدزنگ یا آلیاژهای فولادی ساخته می‌شوند. محفظه در ابتدای تسمه‌ها قرار دارد و پالپ به‌طور یکنواخت بر روی تسمه پخش می‌شود. در زیر تسمه و بین قرقره‌ها، محفظه مکش تعبیه شده‌است. فیلتراسیون محفظه اول در شرایط مکش اتفاق می‌افتد و سیال فیلترشده به قسمت تحتانی جریان می‌یابد. در محفظه دوم، کیک مذکور توسط جریانی مخالف یا موافق با آب بازیافت شده، در شرایط مکش شستشو داده می‌شود. مرحله بعد، جریان آب تازه اضافه می‌شود. این آب نیز از راه محفظه تحتانی، تحت شرایط مکش خارج می‌شود و کیک، شسته و سپس آب‌گیری و خشک می‌شود. در انتهای هر محفظه، مکانی برای جمع‌آوری آب شستشو و سیال فیلترشده وجود دارد. نصب و عملیات فیلترهای نواری نسبت به استوانه‌ای، پرهزینه‌تر است و نیاز به فضای نسبتا بزرگ دارد[۳].

۱-۳- عوامل موثر بر فیلتراسیون

با توجه به اهمیت فیلتراسیون در صنایع مختلف، تعیین عوامل موثر بر عملکرد فرآیند (کاهش رطوبت و افزایش نرخ فیلتراسیون) ضروری است. این معیارها را می‌توان در چهار دسته مجزا تقسیم‌بندی کرد که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته شده است.

توزیع ابعاد، شکل و اندازه ذرات، بار سطح، تراکم‌پذیری و خاصیت آبرانی سطح ذرات به همراه اندازه فضای متخلخل بین آنهاا (فضاهای مویین) برخی از ویژگی‌های تاثیرگذار بر فیلتراسیون هستند[۲].

تخلخل موثر، نسبتی از حجم کل که سیال می‌تواند به‌طور موثر درون آن جریان داشته باشد را نشان می‌دهد. این نوع تخلخل، فقط حفره‌های کور و به‌هم پیوسته را در نظر می‌گیرد و حفره‌های بسته (غیرمتصل) را شامل نمی‌شود. تخلخل موثر اهمیت زیادی در جریان آب‌های زیرزمینی، جریان نفت و همچنین انتقال مواد محلول دارد. تخلخل غیرموثر، نسبتی از حجم کل است که سیال در آن حضور دارد اما نمی‌تواند به‌طور موثر جریان داشته باشد. واضح است که در این نوع تخلخل، تنها حفره‌های بسته مدنظر هستند. با توجه به تعریف تخلخل موثر و غیر موثر، درک مناسب مورفولوژی یک محیط متخلخل از اهمیت بالایی برخوردار است. مواد دارای دانه‌بندی خوب (ذراتی با اندازه تقریبا یکسان) نسبت به مواد مشابه با دانه‌بندی ضعیف، تخلخل بیشتری دارند. در مواد دارای دانه‌بندی ضعیف، ذرات کوچک فضای بین ذرات بزرگ‌تر را پر می‌کنند. در شکل ۱، نحوه پرشدن فضای خالی بین ذرات بزرگ‌تر توسط ذرات ریز در فرایند فیلتراسیون نمایش داده شده است. این مساله باعث کاهش شدید تخلخل و هدایت هیدرولیکی می‌شود[۴].



شکل ۱: نمایش تخلخل موثر و غیرموثر[۴]

خصوصیات پالپ شامل درصد جامد، خصوصیات شیمیایی (pH) و وجود یون‌های آزاد در محیط، ویسکوزیته، دما، نیروی کشش سطحی، چگالی، نیروی دافعه بین ذرات و غیره است. مشخصات مکانیکی دستگاه به ویژه نوع پارچه فیلتر، سرعت دستگاه، حداکثر افت فشار و یا میزان فشار وارده، دوره زمانی و غیره نیز از عوامل موثر هستند. نوع مواد استفاده‌شده به‌عنوان کمک‌فیلتر مانند فلوکولانت، کوآگولانت، کمک‌فیلتر و سطح‌ساز هم می‌توانند موثر واقع شوند[۶،۵].

یکی از راه‌های بهبود فرآیند فیلتراسیون، تجمع ذرات و متراکم‌کردن آنها با استفاده از فرآیندهای کوآگولاسیون و فلوکولاسیون است. همچنین روش دیگر بهبود فرآیند، تغییر شیمی سطح ذرات به‌وسیله سطح‌سازها و تغییر در ساختار کیک توسط کمک‌فیلتر است[۷]. سطح‌سازها ماهیت شیمیایی

دارند که استفاده از آن‌ها در بهبود فرآیند آب‌گیری به‌خوبی شناخته شده است. مکانیزم پیشنهادشده در مورد عملکرد سطح‌سازها شامل جذب در مرز مشترک گاز و مایع و درنتیجه کاهش در کشش سطحی مایع و افزایش زاویه تماس جامد و مایع است. عملکرد آن شامل اثرات ترکیبی از خنثی‌سازی الکترواستاتیک، افزایش تراکم‌پذیری و رهاسازی آب چسبیده به ذرات می‌باشد. خنثی‌سازی بار سطح ذرات، باعث فشردگی لخته‌های تشکیل‌شده می‌شود[۸]. کمک‌فیلترها به دو صورت جامد و یا مایع هستند.کمک‌فیلترهای مایع به‌منظور کاهش رطوبت کیک فیلتراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مزایای آن می‌توان به کاهش میزان رطوبت کیک، تسهیل در رهاسازی کیک در سطح پارچه و کاهش مسدود شدن پارچه اشاره کرد[۹]. آن‌ها با تغییر در ساختار، تخلخل، تراکم‌پذیری، مقاومت هیدرولیکی و نفوذپذیری کیک، باعث افزایش نرخ فیلتراسیون و کاهش رطوبت کیک می‌شوند[۱۰].

۲- پژوهش‌های پیشین

"عرب‌زاده و همکاران" با انجام پژوهشی به بررسی و بهینه‌سازی عوامل موثر بر کاهش رطوبت کیک فیلترهای دیسکی در مقیاس آزمایشگاهی و تعیین سیستم فیلتراسیون مناسب برای ته‌ریز تیکنر باطله کارخانه فرآوری شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر پرداختند. در این تحقیق مشخص شد که افزایش ابعاد ذرات، درصد جامد و فشار، باعث کاهش رطوبت کیک فیلتر می‌شود. نتایج حاصل از تعیین رطوبت و بازیافت آب نشان‌داد که روش فشاری، مناسب‌ترین روش آب‌گیری است و علاوه بر بازیافت بیشتر آب در سال، موجب کاهش هزینه‌ها و مشکلات ناشی از ساخت سد، انتقال پالپ به سد باطله و آلودگی‌های زیست‌محیطی خواهد شد[۱۱].

"پالدی‌وهمکاران" در پژوهشی، امکان‌سنجی سیستم فیلتراسیون خلاء در شرایط تولید خوراک مناسب فرآیند گندله‌سازی در خط چهارم شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر را بررسی کردند. در این تحقیق با بررسی درصدجامد، زمان آب‌گیری و نوع پارچه فیلتر، مناسب‌ترین حالت برای فیلتراسیون به‌دست آمد. همچنین افزایش فشار باعث کاهش میزان رطوبت و زمان تشکیل کیک شد. آزمایش‌هایی که به‌منظور بررسی تاثیر کمک‌فیلترهای نوع فلوکولانت و سطح‌ساز بر عملکرد فیلتراسیون انجام شد، نشان‌داد افزودن فلوکولانت، تاثیر معناداری بر کاهش رطوبت کیک ندارد. با افزایش نرخ فلوکولانت، افزایش نیروهای حاصل از ایجاد لخته‌ها موجب به دام افتادن آب در فضای بین لخته‌ها می‌شود و رطوبت نهایی کیک افزایش می‌یابد. آنها همچنین با بررسی خصوصیات کیک حاصل از فیلتراسیون، دریافتند میزان تراکم‌پذیری و مقاومت کیک از عوامل تاثیرگذار بر فرآیند فیلتراسیون است و سپس با محاسبه مقاومت کیک و زمان فیلتراسیون در فشارهای مختلف، دریافتند که افزایش فشار باعث افزایش مقاومت کیک در برابر آب‌گیری خواهد شد[۱۲].

"اسماعیلی و همکاران" در پژوهشی عوامل موثر بر فیلترشوندگی نمونه ترکیبی باطله کارخانه‌های فرآوری گل‌گهر با استفاده از دستگاه فیلترپرس را تعیین و بهینه‌سازی کردند. پس از انجام آزمایش‌ها، ۴ عامل فشار، زمان مرحله دمیدن هوا، درصدجامد پالپ و ضخامت کیک، به‌ترتیب به عنوان عوامل موثر بر رطوبت نهایی کیک فیلتر مشخص شدند. زمان مرحله دمیدن هوا، ضخامت کیک، زمان مرحله فشرده‌سازی، درصد جامد پالپ، اثرات متقابل زمان مرحله دمیدن هوا- زمان مرحله فشرده‌سازی و اثر متقابل زمان مرحله دمیدن هوا-درصد جامد پالپ، نیز به‌ترتیب به‌عنوان عوامل موثر بر توان عملیاتی فیلتراسیون شناخته شدند. با بررسی تاثیر pH پالپ بر فیلترشوندگی باطله کارخانه‌ها، کمترین رطوبت کیک فیلتر و بیشترین توان عملیاتی فیلتراسیون، در pH خنثی و قلیایی و بدترین نتایج، برای pH اسیدی به‌دست آمد. افزایش توان عملیاتی در pH قلیایی نسبت به pH اسیدی، سبب کاهش سطح فیلتر مورد نیاز در مقیاس صنعتی شد. همچنین با بررسی تاثیر ترکیب دو جریان باطله بر روی ضریب تراکم‌پذیری کیک فیلتر، مدلی برای تعیین این ضریب معرفی شد که توانست با دقت بالایی آن‌را برای نمونه‌های ترکیبی با نسبت‌های مختلف تخمین بزند[۱۳].

"ایزدی و همکاران" در پژوهش خود، اقدام به بررسی تاثیر جنس و بافت پارچه فیلتر بر معیارهای عملیاتی فیلتراسیون کنسانتره کارخانه‌های بازیابی هماتیت و سولفورزدایی کردند. در این تحقیق به‌منظور تعیین پارچه فیلتر مناسب، از روش فیلتراسیون خلاء با خوراک‌دهی از پایین استفاده شد. نتایج نشان‌داد استفاده از پارچه با جنس پلیپروپیلین و بافت جناغی همراه با توان عملیاتی مطلوب، رطوبت را کاهش می‌دهد. هم‌چنین استفاده از این نوع پارچه باعث کاهش کدورت فیلتریت شد که از لحاظ زیست‌محیطی حایز اهمیت است[۱۴].

"مام قادری و همکاران" در مورد تعیین نوع پارچه مناسب برای فیلتراسیون باطله‌های سنگ آهن با استفاده از فیلتر خلاء دیسکی تحقیق کردند. آنها با آزمایش ۶ نوع پارچه و

همچنین استفاده از کمک‌فیلتر به این نتیجه دست یافتند که پارچه پلی‌پروپیلین و کمک‌فیلتر باعث کاهش رطوبت کیک فیلتر مقیاس صنعتی شد. هم‌چنین بررسی معیارهای موثر بر فیلترشوندگی با استفاده از روش فیلتراسیون فشاری نشان‌داد که پارچه از نوع پلی‌پروپیلین و افزودن فلوکولانت و سطح‌ساز، رطوبت کیک فیلتر را کاهش و توان عملیاتی را افزایش می‌دهد[۱۵،۱۶].

"سینگ" تاثیر تغییر در خواص سطح ذرات در آب‌گیری ذغال ریزدانه را بررسی‌کرد. وی به این نتیجه رسید که رطوبت کیک در pH نزدیک به پتانسیل بار صفر (ZPC)،به کمترین مقدار می‌رسد. سطح‌ساز سدیم دودسیل سولفات(SDS) نسبت به ستیل‌تری متیل آمونیوم برمید (CTAB)، موثرتر عمل می‌کند. حضور SDS به دلیل تغییر در قابلیت ترشوندگی سطح ذرات ذغال، به‌طور قابل توجه منجر به افزایش نرخ فیلتراسیون و کاهش رطوبت باقیمانده در کیک می‌شود[۱۷].

"سینگ و برسا" با انجام پژوهشی در مورد تاثیر فلوکولانت‌ها و سطح‌سازهای استفاده‌شده در مرحله ته‌نشینی، بر فیلتراسیون آهن ریزدانه به نتایج زیر دست یافتند: با انتخاب فلوکولانت مناسب، نرخ ته‌نشینی افزایش یافت. همچنین با افزودن فعال‌کننده سطح، میزان رطوبت باقی‌مانده در کیک، کاهش و نرخ فیلتراسیون، افزایش یافت. با افزودن سطح‌ساز سدیم پترولیم سولفونات، میزان مقاومت کیک کاهش یافت [۱۸].

"لایهونگ وهمکاران" به‌بررسی کارایی فیلتراسیون با افزودن کمک‌فیلترهای دیاتومیت و خاکاره پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزودن کمک‌فیلتر باعث تغییر در ساختار، تخلخل، تراکم‌پذیری، مقاومت هیدرولیکی و نفوذپذیری کیک حاصل و هم‌چنین موجب افزایش نرخ فیلتراسیون و کاهش رطوبت کیک می‌شود[۱۹].

"هسلهن و همکاران" به بررسی تاثیر پاشیدن CO_2 بر نرخ فلوکولاسیون و فیلتراسیون از پالپ حاوی کنسانتره هماتیت پرداختند. پاشیدن CO_2 بر روی پالپ هماتیت، به‌دلیل تغییر pH و شیمی سطح ذرات، باعث افزایش نرخ فیلتراسیون می‌شود. با افزودن CO_2 و تغییر pH از قلیایی به خنثی، نرخ فیلتراسیون افزایش یافت[۲۰].

"فی وانگ و همکاران" در تحقیق خود به بررسی فرآیند آب‌گیری از لجن فعال به‌کمک سطح‌سازهای کاتیونی پرداختند و نتیجه آن ثابت کرد که سطح‌سازها به‌طور قابل توجهی، قابلیت آب‌گیری از پالپ را به‌دلیل کاهش مقاومت و رطوبت کیک، افزایش می‌دهند. در این تحقیق سطح‌ساز CTAB به‌دلیل خاصیت آب‌رانی بیشتر نسبت به DTAB، در آزادسازی پیوند آب با ذرات جامد، موثرتر عمل کرد[۲۱].

"ایرانمنش و همکاران" در مورد بررسی تاثیر افزایش کمک‌فیلتر بر کارایی عملیات فیلتراسیون کارخانه زغال‌شویی زرند تحقیق کردند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کمک‌فیلتر، کارایی فیلتراسیون در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی افزایش یافت[۹].

"ملایجردی و همکاران" به بررسی تاثیر نوع بافت پارچه فیلتر پلی‌استر و همچنین نحوه تاثیر کمک‌فیلتر بر کارایی مدار فیلتراسیون مجتمع معدنی و صنعتی چادرملو پرداختند. آنها با بررسی ۵ نوع پارچه فیلتر از جنس پلی‌استر با بافت‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که پارچه فیلتر پلی‌استر با بافت جناغی فشرده، باعث کاهش رطوبت، افزایش ضخامت کیک‌فیلتر و کاهش کدورت فیلتریت نسبت به حالت مبنا شد. همچنین با انجام آزمایش‌هایی در غلظت‌های مختلف کمک‌فیلتر، دریافتند که کمک‌فیلتر باعث افزایش کارایی آب‌گیری و کاهش رطوبت شد[۲۲].

"لیو و همکاران" در تحقیقی به‌بررسی اثر ستیل‌تری متیل آمونیوم برمید بر ترک‌های انقباضی کیک فیلتر کنسانتره سنگ آهن در فیلتراسیون فشاری پرداختند. در این تحقیق، اثر سورفکتانت بر کشش سطحی، زاویه تماس و میزان ترک‌ها در کیک فیلتر بررسی شد. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت سورفکتانت باعث افزایش پتانسیل زتا و مثبت‌شدن بار سطحی ذرات کنسانتره آهن، افزایش زاویه تماس و همچنین کاهش کشش سطحی آب شد. در نتیجه از میزان ترک‌های انقباضی کیک فیلتر کاسته شد[۲۳].

"مام قادری و همکاران" پژوهشی را برای بهینه‌سازی معیارهای فیزیکی در فرایند فیلتراسیون با تمرکز بر جریان سیال از منافذ انجام دادند. در این تحقیق عوامل فیزیکی شامل پارچه فیلتر، درصد جامد، افت فشار و ضخامت کیک فیلتر، بررسی و اثر آنها بر رطوبت کیک، مقاومت ویژه کیک، نرخ تشکیل کیک و بازیابی آب، مورد ارزیابی قرار گرفت. آنها به این نتیجه رسیدند که پارچه فیلتر مناسب باید دارای نفوذپذیری بالا، مقاومت پایین در برابر عبور سیال بوده و نرخ تشکیل کیک و رطوبت کیک فیلتر در آن کمترین مقدار باشد.

با افزایش درصدجامد نرخ تشکیل کیک و مقاومت ویژه آن به دلیل جلوگیری از عبور سیال در اثر مسدودشدن برخی از منافذ پارچه فیلتر افزایش می‌یابد. بیشترین میزان بازیابی آب در حالتی اتفاق می‌افتد که نرخ فیلتراسیون بر مقاومت ویژه

غلبه کند. با افزایش فشار برخی از مواد در اثر متراکم‌شدن، ساختار کیک را تغییر می‌دهند. درصورتی‌که تراکم‌پذیری کیک بالا باشد، افزایش فشار موجب کاهش ضخامت کیک، افزایش بازیابی آب و افزایش مقاومت ویژه آن خواهد شد. اثر افزایش ضخامت کیک به‌صورت افزایش ظرفیت کارخانه و توان عملیاتی خود را نشان می‌دهد اما باید ضخامت کیک در حد بهینه‌ای باشد که بر رطوبت محصول، نرخ فیلتراسیون و مقاومت ویژه کیک، اثر منفی نگذارد[۲۴].

"اجتماعی و همکاران" در تحقیقی به بررسی اثر هم‌افزایی سورفکتانت و فلوکولانت بر آب‌گیری زغال‌سنگ بسیار ریزدانه پرداختند. در این تحقیق از سورفکتانت‌های آنیونی و کاتیونی به ترتیب دی‌اکتیل سدیم سولفوساکسینات (AD)، ستیل‌تری متیل آمونیوم برمید (CTAB) و فلوکولانت آنیونی پلی‌آکریل‌آمید استفاده کرده و به بررسی نرخ آب‌گیری، رطوبت کیک فیلتر و بازیابی ذرات جامد پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که سورفکتانت کاتیونی، به‌واسطه کاهش بیشتر کشش سطحی و افزایش زاویه تماس، اثر بهتری بر افزایش نرخ آب‌گیری، کاهش رطوبت کیک فیلتر و افزایش بازیابی ذرات جامد نسبت به سورفکتانت آنیونی دارد. همچنین با ترکیب سورفکتانت کاتیونی و فلوکولانت آنیونی مشاهده شد که نتایج نسبت افزودن فلوکولانت به تنهایی بهتر است[۲۵].

"کوپاردی و همکاران" در پژوهشی به بررسی بهینه‌سازی فرایند آب‌گیری زغال‌سنگ دانه‌درشت در مقیاس صنعتی بااستفاده از سانتریفیوژ و به‌کمک سورفکتانت پرداختند. در این تحقیق نرخ خوراک‌دهی، رطوبت خوراک و غلظت سورفکتانت و تاثیر متقابل آنها بررسی شد. سورفکتانت‌های مورد استفاده سدیم دودسیل سولفات آنیونی (SDS)، ستیل تری‌متیل آمونیوم‌برمیدکاتیونی (CTAB) بود و از یک مونوآلکیل استر به‌عنوان سورفکتانت غیریونی استفاده شد. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت سورفکتانت‌ها و جذب در فصل مشترک گاز-مایع، کشش سطحی کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش با افزودن سورفکتانت غیریونی به‌دست آمد. با افزایش نرخ خوراک‌دهی تا حد بهینه، رطوبت محصول کاهش و با افزایش آن به‌دلیل کاهش زمان ماند ذرات در سانتریفیوژ، رطوبت محصول افزایش می‌یابد. رطوبت خوراک و رطوبت محصول باهم رابطه خطی دارند. افزایش غلظت سورفکتانت،کاهش رطوبت محصول و افزایش توان عملیاتی به دنبال دارد. کمترین رطوبت محصول نیز در بالاترین غلظت سورفکتانت و پایین‌ترین نرخ خوراک‌دهی به‌دست آمد[۲۶].

۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، آزمایش‌ها به دو بخش اثر عوامل فرایندی و اثر سطح‌سازها تقسیم شد. در بخش اول، هدف از آزمایش‌های فیلتراسیون، بررسی اثر اندازه ذرات (در دو سطح ۷۵ و ۱۰۵ میکرون)، درصدجامد (در سه سطح ۵۵٪، ۶۰٪ و ۶۵٪)، فشار خلاء (درسه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ کیلوپاسکال) و زمان آب‌گیری (در سه سطح ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ثانیه) بر رطوبت کیک‌فیلتر و تعیین نقاط بهینه بود. هدف از انجام آزمایش‌های بخش دوم، تعیین نوع سطح‌ساز، غلظت مناسب و بررسی اثر آنها بر رطوبت و توان عملیاتی(ظرفیت ویژه) بود. آزمایش‌های بخش اول فیلتراسیون بر روی کنسانتره مگنتیت خط ۵ انجام شد.

۳-۱-شناسایی خوراک

خوراک این آزمایش‌ها با نمونه‌گیری از کنسانتره جداکننده مغناطیسی شدت پایین که قبل از فیلترهای نواری قرار دارد تامین شد. نمونه‌گیری در یک شیفت به مدت ۴ ساعت، هر ۲۰ دقیقه انجام شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده، پس از آب‌گیری و خشک‌کردن، همگن‌شده و توسط ریفل، تقسیم شد. به‌منظور اطلاع از ویژگی‌های فیزیکی خوراک، نمونه تحت آنالیز دانه‌بندی قرار گرفت. دانه‌بندی به روش آنالیز سرندی‌تر با استفاده از سری سرندهای استاندارد۱۸۰ ASTM، ۱۵۰، ۱۲۰، ۹۰، ۷۵، ۵۳ و ۳۸ میکرون انجام شد. داده‌ها توسط نرم‌افزار صفحه گسترده Excel، تجزیه و تحلیل شدند. آنالیز شیمیایی نمونه نیز برای تعیین درصد عناصر و ترکیبات محتوی به روش XRF و تیتراسیون در آزمایشگاه مرکزی پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل‌گهر انجام شدند.

۳-۲- مواد استفاده شده

در این آزمایش‌ها از سطح‌ساز آنیونی سدیم دودسیل سولفات(SDS)،ساخت شرکت Merck آلمان، سطح‌ساز غیریونی پلی اتیلن گلیکول(PEG4000)، ساخت شرکت Merck آلمان، سطح‌ساز کاتیونی سیتیل‌تری میتیل آمونیوم‌برمید(CTAB)، ساخت شرکت Alfa Aesar آمریکا، و سطح‌ساز آنیونی سدیم لوریل اتر سولفات(SLES)، ساخت شرکت حلال شیمی شکوهیه استفاده شد. مواد استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

۳-۳- آزمایش‌های فیلتراسیون

تمام آزمایش‌های فیلتراسیون خلاء به‌وسیله قیف بوخنر در

جدول ۱: مشخصات سورفکتانت‌های مورد استفاده

نام ماده	نوع	جرم مولی (g/mol)	گروه آبدوست	گروه آبران
سدیم دودسیل سولفات	سورفکتانت آنیونی	۲۸۸٫۴	سولفات	دودسیل
ستیل تری متیل آمونیوم برمید	سورفکتانت کاتیونی	۳۶۴٫۴	آمونیوم	ستیل
پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰۰	سورفکتانت غیریونی	۳۶۰۰- ۴۴۰۰	-	-
سدیم لوریل اتر سولفات	سورفکتانت آنیونی اتوکسیله	۴۲۰	سولفات	دودسیل

پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل گهر سیرجان انجام شد. ابتدا کف قیف از پارچه فیلتر مصرفی کارخانه پوشیده شد و روی استوانه مدرج قرار گرفت. فصل مشترک استوانه مدرج و قیف بوخنر جهت ممانعت از ورود و خروج هوا درزگیری شد. سپس استوانه توسط شلنگ رابط به پمپ خلاء Sparmax متصل شد. خوراکدهی به قیف از سمت بالا (روش خوراک‌دهی از بالا) انجام شد.

فیلترهای نواری خط ۵ و ۶ به‌وسیله پالپی با درصدجامد ۵۵ تا ۵۸ درصد، زمان آب‌گیری(براساس فرکانس گردش نوار فیلتر) به‌طور متوسط ۱۱۰ ثانیه و فشار خلاء ۴۰ تا۶۰ کیلوپاسکال فعالیت می‌کنند. در آزمایش‌ها، پالپ پس از آماده‌شدن با مشخصات معین، در قیف ریخته و شیر مکش پمپ باز شد. در این فرآیند، ابتدا آب موجود در بالای پالپ از قیف خارج و سطح کیک نمایان می‌شود. بازه زمانی این مرحله، زمان تشکیل کیک نامیده می‌شود. پس از آن، فشار خلاء باعث متراکم‌شدن کیک‌فیلتر و خروج آب از آن می‌شود و این عمل تا مدت زمان تعیین‌شده به پایان برسد، ادامه می‌یابد. با اتمام آب‌گیری، کیک از قیف جدا و توزین می‌شود. پس از خشک‌شدن کیک در آون، مجددا توزین و طبق رابطه ۱ رطوبت آن محاسبه شد.

دو نمونه پارچه فیلتر که به‌طور متداول در فیلترهای نواری خط ۵ و ۶استفاده می‌شد، برای تشخیص خصوصیات پارچه فیلتر شامل نوع جنس و بافت، وزن هر مترمربع و میزان نفوذپذیری هوا، در آزمایشگاه دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه یزد بررسی شدند. برای تعیین نوع بافت پارچه‌ها، از میکروسکوپ باینا‌کولار استفاده شد. وزن هر مترمربع پارچه با دستگاه Portable cloth balance، ساخت شرکت Shirley و میزان نفوذپذیری هوا در پارچه با دستگاه Air permeability tester، ساخت شرکت Shirley محاسبه شد. برای مقایسه پارچه‌ها از نظر رطوبت کیک و میزان آب‌گیری، هرکدام از آنها تحت آزمایش‌های فیلتراسیون در شرایط عملیاتی بهینه گرفت.

پس از آن، به‌منظور بررسی اثر سطح‌سازها در شرایط بهینه به‌دست آمده از عوامل فرایندی، آزمایش‌های فیلتراسیون انجام شد. برای آماده‌سازی سطح‌سازها، یک گرم از ماده شیمیایی در یک لیتر آب معمولی در دمای اتاق حل شد و به‌مدت ۲ ساعت تحت همزن قرارگرفت. محلول به‌دست آمده در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرم‌برتن به پالپ، منتقل و پس از ۵ دقیقه هم‌زدن تحت آزمایش فیلتراسیون قرار گرفت.

تحلیل آزمایش فیلتراسیون به‌کمک سطح‌سازها و با ثبت نرخ فیلتراسیون به‌وسیله اندازه‌گیری حجم فیلتریت جمع‌آوری‌شده در فواصل زمانی مختلف صورت گرفت. زمان کل فیلتراسیون برابر با زمان تشکیل کیک و زمان آب‌گیری درنظر گرفته شد.

برای بیان عملکرد فیلتراسیون به‌طور رایج از رطوبت کیک فیلتر و توان عملیاتی استفاده می‌شود. رطوبت کیک با استفاده از رابطه۱ محاسبه شد که در آن M وزن کیک است. توان عملیاتی یا ظرفیت فیلتر، بیان‌گر مقدار کیک تولیدشده بر واحد سطح، در واحد زمان است که معمولا به‌صورت تن برساعت در مترمربع بیان می‌شود. رابطه ۲، بیانگر توان عملیاتی است که در آن M وزن کیک خشک‌شده و تشکیل‌شده بر روی پارچه فیلتر (کیلوگرم)، T کل زمان یک دوره کامل فیلتراسیون (ثانیه) و A، مساحت سطح پارچه فیلتر (مترمربع) است. تخلخل کیک نیز از رابطه ۳ محاسبه شد که در آن V_P تخلخل کیک، W_S و W_D به‌ترتیب وزن کیک تر و خشک و D_W، دانسیته آب است.

$$\text{Moisture} = \frac{M_{wet} - M_{dry}}{M_{wet}} * 100 \qquad (۱)$$

$$\text{Throughput} = \frac{M_{dry}}{A.T} \qquad (۲)$$

$$V_P = \frac{W_S - W_D}{D_W} \qquad (۳)$$

شکل ۲: رابطه رطوبت و عدد بلین کنسانتره در داده‌های رطوبت و بلین کنسانتره مگنتیت خط ۵ در طول ۹۰ روز

۴- نتایج و بحث

۴-۱- پایش رطوبت و بلین کنسانتره

به‌منظور بررسی اثر رطوبت بر بلین کنسانتره، داده‌های ۹۰ روز متوالی مورد بررسی قرارگرفت و نتایج نشان‌داد با افزایش رطوبت کنسانتره، حداکثر بلین قابل دستیابی، کاهش می‌یابد. شکل۲، رابطه رطوبت کنسانتره و بلین در خط ۵ را در بازه زمانی مذکور نشان می‌دهد.

۴-۲- شناسایی خوراک آزمایش‌های فیلتراسیون

خوراک فیلتراسیون، کنسانتره مگنتیت خط ۵ و ۶ است. طبق شکل۳، نتایج آنالیز تجزیه سرندی نشان می‌دهد که در d80، اندازه ذرات برابر ۱۰۵میکرون است. مشخصات شیمیایی کنسانتره در جدول ۲ نشان داده شده است.

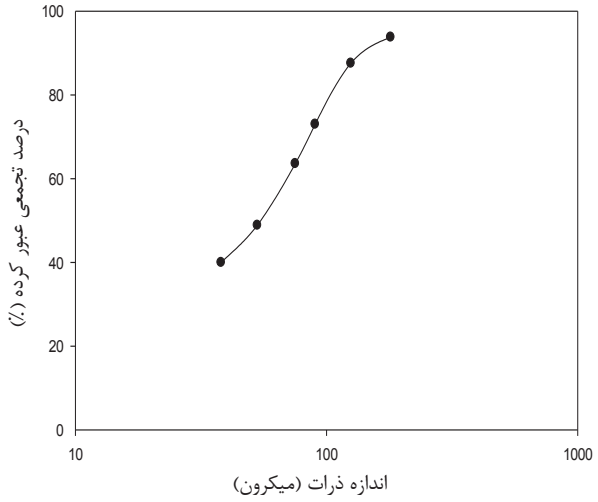
۴-۳- اثر فشار خلاء بر رطوبت

به‌منظور بررسی اثر فشار خلاء بر رطوبت کیک، آزمایش‌هایی با شرایط مشابه کارخانه (اندازه ذرات ۱۰۵میکرون، درصدجامد ۶۰٪، زمان آب‌گیری ۱۲۰ ثانیه) در فشارهای خلاء ۴۰، ۵۰ و ۶۰ کیلوپاسکال انجام شد. نتایج در جدول۳ و شکل۴، نشان داده شده است. با افزایش فشار از ۴۰به۵۰کیلوپاسکال، رطوبت، ۰٫۴ درصد کاهش یافت. علت آن می‌تواند افزایش فشار و نرخ آب‌گیری باشد. وقتی فشار از ۵۰ به ۶۰کیلوپاسکال افزایش یافت، تغییر محسوسی در رطوبت کیک ایجاد نشد. این امر می‌تواند به‌خاطر تراکم کیک و بسته‌شدن برخی از فضاهای مویینه باشد. درصورتی که در فشار بالاتر از ۶۰کیلوپاسکال، نیروی فشار می‌تواند با غلبه بر تراکم ذرات، آب بیشتری از کیک خارج کند[۲۴].

حداکثر افت فشار ایجادشده برای تشکیل کیکی با رطوبت

جدول ۲: آنالیز XRF خوراک آزمایش‌های فیلتراسیون

عنصر (ترکیب)	%Fe	%FeO	%Al2O3	%SiO2	TiO2
عیار	۶۹	۲۶	۱٫۳۱	۰٫۲۶	۰٫۰۴
عنصر (ترکیب)	%CaO	%MgO	%S	%P	L.O.I
عیار	۰٫۳۱	۰٫۲۲	۰٫۳	۰٫۰۵	۲٫۵۱



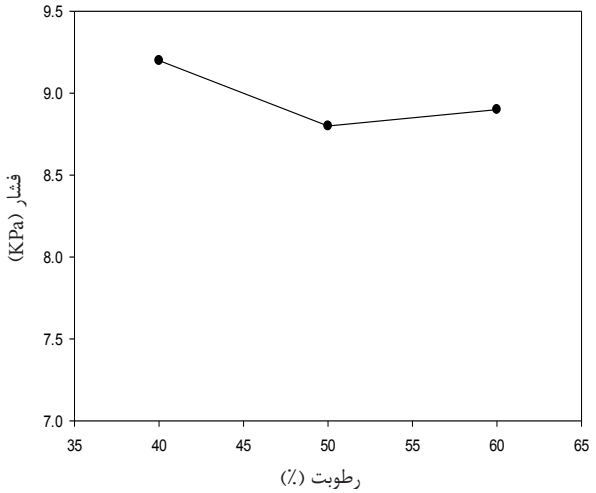
شکل ۳: تجزیه سرندی خوراک آزمایش‌های فیلتراسیون

و ضخامت معلوم، یکی از شاخص‌های عملیاتی دستگاه است که در کارآیی و بهره‌وری فرآیند موثر است. براساس مطالعات انجام شده، هر چه افت فشار بیشتر باشد، فیلتراسیون سریع‌تر انجام می‌شود. از سوی دیگر، فشار بالاتر منجر به تخلخل کمتر کیک می‌شود. تاثیر فشار، زمانی که نیروی دافع بین ذرات کم شود، چشم‌گیرتر خواهد بود[۲۳].

در فیلترهای نواری صنعتی به‌دلیل بروز فرآیند نشتی، بیشینه فشار خلاء قابل دستیابی معادل ۶۰-۵۰کیلو پاسکال است. همچنین به‌خاطر ارتفاع منطقه از سطح دریا، امکان رسیدن به فشارهای بیشتر از ۶۰کیلوپاسکال، در تجهیز پمپ خلاء آزمایشگاهی و صنعتی امکان‌پذیر نیست. از طرفی با توجه به تاثیر مستقیم میزان خلاء بر درصد رطوبت کیک تولیدی، تمامی آزمایش‌ها در حداکثر فشار قابل دست‌یابی(۶۰ کیلوپاسکال)، انجام شد. هنگامی که پالپ در قیف بوخنر قرار دارد، هیچ‌گونه هوا و فضای خالی درون کیک وجود ندارد. زمانی فضای خالی درون کیک به‌وجود می‌آید که مرحله آب‌گیری شروع شود. در مرحله آب‌گیری، آب درون کیک، جای خود را به هوا می‌دهد. وقتی که تحت شرایط ثابت، فشار افزایش یابد، آب بیشتری تخلیه می‌شود و جای آن را هوا می‌گیرد. سپس مواد جامد به حفرات فشار آورده و از حجم هوا کاسته می‌شود. با توجه به این‌که فقط آب درون لوله‌های موبین قابل تخلیه است، اگر این مقدار ناچیز باشد، افزایش فشار تاثیر چندانی بر رطوبت نخواهد داشت. عموما وقتی که اندازه ذرات درشت‌تر می‌شود، انتظار می‌رود که آب‌گیری بهتر انجام شود و رطوبت کاهش یابد. افزایش فشار باعث بالارفتن میزان تراکم ذرات، کاهش تخلخل و افزایش مقاومت کیک می‌شود. اگر چه میزان مقاومت کیک افزایش پیدا می‌کند ولی در فشارهای بالاتر، توانایی غلبه بر مقاومت کیک افزایش می‌یابد که نتیجه آن باعث بهبود عملکرد فیلتراسیون و کاهش رطوبت نهایی می‌شود.

جدول ۳: نتایج بررسی اثر فشار خلاء بر ویژگی‌های کیک

فشار خلأ (کیلوپاسکال)	رطوبت	تخلخل (%)	حجم فیلتریت زمان تشکیل کیک (ml)
۴۰	۹٫۲	۳۳	۳۲۵
۵۰	۸٫۸	۳۲	۳۵۰
۶۰	۸٫۹	۳۲	۳۶۰



شکل ۴: اثر فشار خلاء بر رطوبت کیک

۴-۴- اثر زمان آب‌گیری بر رطوبت

برای بررسی و تعیین زمان مناسب آب‌گیری، از کنسانتره با d80 معادل ۱۰۵میکرون استفاده شد. جدول ۳، شرایط آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. پالپ‌هایی با ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درصد جامد، تهیه و آب‌گیری در سه سطح زمانی ۶۰، ۹۰ و۱۲۰ ثانیه انجام شد. زمان فیلتراسیون مجموع زمان تشکیل کیک و زمان آب‌گیری است. نتایج این آزمایش در جدول۴ و شکل ۵ نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش زمان آب‌گیری در درصدجامدهای مختلف، رطوبت کاهش می‌یابد. در درصدجامد ۵۵، رطوبت کیک‌فیلتر در زمان ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه یکسان است ولی در ۶۰ ثانیه به‌دلیل کمبود زمان ماند کافی برای قرار گرفتن در معرض فشار و در پی‌آن تشکیل کیک، آب موجود در ساختار کیک نتوانسته به خوبی از لوله‌های مویین خارج شود. بنابراین رطوبت، کاهش محسوسی نداشته است. وقتی همراه با افزیش درصدجامد از ۵۵ به۶۰ زمان آب‌گیری از ۶۰ به۹۰ ثانیه افزایش می‌یابد، شیب کاهش رطوبت برای۹۰ ثانیه، به‌مراتب بیشتر از ۶۰ ثانیه است. این افزایش شیب با افزایش درصدجامد از ۶۰ به ۶۵ شدت بیشتری می‌یابد. باتوجه به محدودیت تجهیزات انتقال مواد در کارخانه و همچنین درصدجامد مناسب برای خوراک فیلتر، بررسی زمان در درصدجامد ۵۵ و۶۰ اهمیت بیشتری دارد. مشاهده می‌شود که با افزایش زمان آب‌گیری از ۶۰ به۱۲۰ ثانیه، رطوبت کیک فیلتر از ۹٫۶ به ۸٫۵ کاهش یافته است. علت آن، وجود زمان کافی برای خروج آب از کیک‌فیلتر است. براساس رابطه ۲، با افزایش زمان آب‌گیری و افزایش درصد جامد، توان عملیاتی

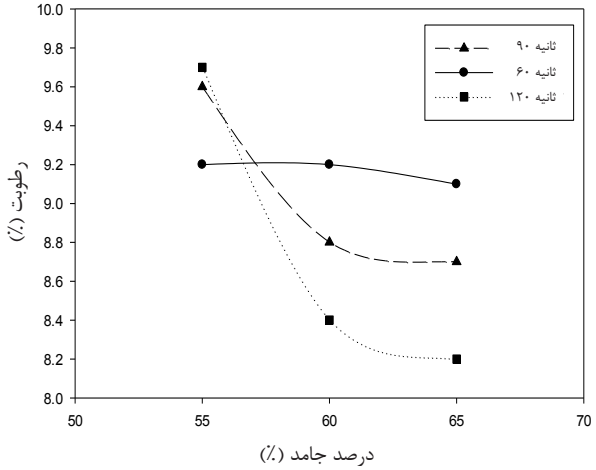
کاهش می‌یابد. در عمل نیز توان عملیاتی در درصدجامد ۵۵، با افزایش زمان آب‌گیری از ۶۰ به ۱۲۰ ثانیه، از ۱۳۳۷ به ۹۲۳ کاهش یافته است. در درصدجامد ۶۰٪، با افزایش زمان، توان عملیاتی ابتدا، کاهش و سپس در ۱۲۰ ثانیه،افزایش یافته است. در درصدجامد ۶۵٪، نتایج مشابه درصدجامد ۶۰٪ است. با این حال از آن‌جا که هدف از فیلتراسیون، کاهش رطوبت همراه با افزایش توان عملیاتی است، می‌توان نتیجه‌گرفت که درصدجامد ۶۰٪ و زمان آب‌گیری ۱۲۰ ثانیه، نقطه بهینه از این نظر است. در فیلتراسیون، زمان چرخه کامل اهمیت زیادی دارد و تاثیر زیادی بر میزان رطوبت کیک و قابلیت جداشدن آن از روی پارچه فیلتر دارد. افزایش زمان سیکل، باعث کاهش رطوبت و افزایش ضخامت کیک می‌شود که در نتیجه آن، کیک ایجادشده راحت‌تر از روی پارچه تخلیه می‌شود. اثر شاخص زمان فیلتراسیون کاملا مشخص است. افزایش زمان فیلتراسیون، باعث کاهش رطوبت نهایی کیک خواهد شد. اما باید به چرخه فیلتراسیون در دستگاه نیز توجه داشت. افزایش زمان اگرچه باعث کاهش رطوبت می‌شود اما با توان عملیاتی و ظرفیت فیلتراسیون، برهم‌کنش متقابل دارد. برای افزایش زمان فیلتراسیون، باید سرعت چرخش فیلتر نواری کاهش‌یابد. باتوجه به ثابت‌بودن دبی(حجم) خوراک ورودی به فیلتر، افزایش زمان فیلتراسیون اگرچه موجب افزایش ضخامت کیک و در ظاهر افزایش تولید کیک است اما باعث افزایش رطوبت کیک و کاهش توان عملیاتی خواهد شد. بنابراین زمان بهینه فیلتراسیون باید متناسب با ظرفیت تولید و دبی خوراک ورودی انتخاب شود و در این‌جا زمان بهینه، ۱۲۰ ثانیه است[۲۶].

۴-۵- اثر اندازه ذرات بر رطوبت

اثر اندازه ذرات کنسانتره بر فرایند فیلتراسیون و رطوبت نهایی در دو بخش ۷۵ و ۱۰۵ میکرون بررسی شد. برای تهیه کنسانتره ۷۵میکرونی، کنسانتره ۱۰۵میکرونی به‌مدت ۵۰ دقیقه در آسیای گلوله‌ای خردایش یافت. پالپ‌هایی با درصد جامد ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درصد تهیه و تحت فشار خلاء ۶۰ کیلوپاسکال و مدت زمان آب‌گیری ۲ دقیقه، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول۵ و شکل۶ نشان داده‌شده است. اثر اندازه ذرات بر رطوبت در دو سطح ۷۵ و ۱۰۵ میکرون نشان می‌دهد، رطوبت کیک در ذرات ۱۰۵میکرون، کمتر از ۷۵ میکرون است. روند کاهش رطوبت در درصدجامدهای مختلف برای ذرات ۷۵میکرونی تغییر چندانی ندارد و علت آن نیز کاهش مجراهای مویینه و تراکم بیشتر ذرات در کیک

جدول ۴: نتایج بررسی اثر زمان آب‌گیری بر رطوبت کیک

زمان آبگیری (ثانیه)	درصد جامد	رطوبت (%)	توان عملیاتی ($Kg/h.m^2$)
۶۰	۵۵	۹٫۶	۱۳۳۷
۹۰	۵۵	۹٫۲	۱۰۱۰
۱۲۰	۵۵	۹٫۷	۹۲۳
۶۰	۶۰	۸٫۸	۱۵۵۸
۹۰	۶۰	۹٫۲	۱۱۵۳
۱۲۰	۶۰	۸٫۴	۱۴۲۱
۶۰	۶۵	۸٫۷	۱۵۵۷
۹۰	۶۵	۹٫۱	۱۲۴۰
۱۲۰	۶۵	۸٫۲	۱۰۱۸



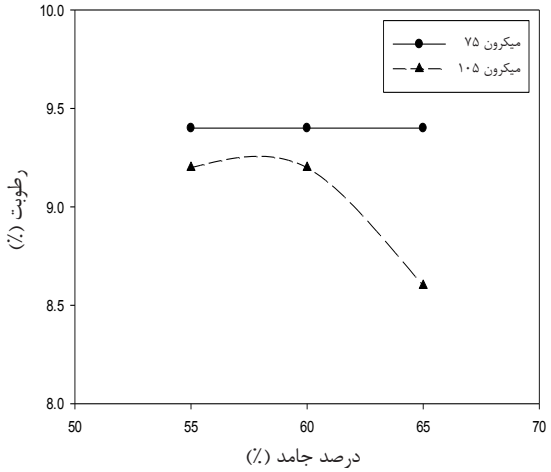
شکل ۵: اثر زمان آب‌گیری بر رطوبت در درصد جامدهای مختلف

است. حضور ذرات ریز باعث کاهش فضای خالی و بسته‌شدن مجراهای مویینه در کیک فیلتر می‌شود. این عمل موجب به دام‌افتادن آب در بافت کیک فیلتر می‌شود. برای ذرات ۱۰۵ میکرون، با افزایش درصدجامد از ۶۰٪ به ۶۵٪، رطوبت به‌میزان ۰٫۷ درصد کاهش می‌یابد. علت آن غلظت بالای پالپ است که در مدت زمان آب‌گیری یکسان بوده است. بدیهی است حضور مقدار کمتر آب در پالپ، رطوبت پایین‌تر کیک را به‌همراه دارد. همچنین درشت‌بودن اندازه ذرات باعث فراهم‌آوردن فضاهای خالی بیشتر و سهولت در عبور آب از بافت کیک و خارج‌شدن آن می‌شود.

اندازه ذرات در مراحل ته‌نشینی و فیلتراسیون نقش بسیار مهمی در مدت زمان انجام فرآیند ایفا می‌کنند. براساس نتایج تحقیقات انجام‌شده، افزایش اندازه ذرات باعث افزایش اندازه

جدول ۵: نتایج بررسی اثر اندازه ذرات بر فرایند فیلتراسیون

اندازه ذرات (میکرون)	درصد جامد	رطوبت (%)	تخلخل (%)
۷۵	۵۵	۹٫۴	۳۲٫۳
۷۵	۶۰	۹٫۴	۳۲٫۸
۷۵	۶۵	۹٫۴	۳۳
۱۰۵	۵۵	۹٫۲	۳۱٫۵
۱۰۵	۶۰	۹٫۲	۳۱٫۵
۱۰۵	۶۵	۸٫۶	۳۱



شکل ۶: اثر اندازه ذرات بر رطوبت کیک فیلتر

لوله‌های مویین بین آنها و در نتیجه نفوذپذیری بیشتر کیک می‌شود که این امر، کاهش زمان فیلتراسیون را به‌دنبال خواهد داشت[۲۷]. همچنین مقدار مواد ریزتر از ۷۵میکرون، یک معیار تعیین‌کننده در روش فیلتراسیون است. وجود ذرات ریز منجر به‌کاهش ظرفیت تولید، اجرای ناقص عملیات فیلتراسیون و افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود[۲]. به‌طورکلی شکل ذرات بار ورودی فرآیند فیلتراسیون، کروی در نظر گرفته می‌شود. داشتن اشکال کروی و هم‌اندازه ذرات، منجربه جورشدگی آنها در کیک فیلتر می‌شود. به‌این‌ترتیب فضای خالی ایجادشده بین کیک منجر به یک‌نواختی و کاهش رطوبت کیک فیلتر خواهد شد[۲۸]. از طرفی کروی نبودن ذرات، منجر به گرفتگی منافذ پارچه، کاهش نفوذپذیری کیک و کاهش توان عملیاتی می‌شود[۲].

وجود ذرات ریز کاهش ظرفیت، کاهش عملکرد فیلتراسیون و افزایش هزینه‌های عملیاتی را به‌دنبال دارد. در دستگاه‌های فیلتراسیون، توزیع ابعادی خوراک با سطح مخصوص ذرات به منظور افزایش کیفیت محصول فیلتراسیون، در محدوده مشخصی کنترل می‌شود. اشکال مختلف ذرات بر فرایند فیلتراسیون تاثیرگذار هستند. ذرات با شکل کروی و هم‌اندازه، با ایجاد فضای خالی در کیک باعث افزایش نفوذپذیری و کاهش رطوبت آن می‌شوند [۲۹]. در مقابل، کروی‌نبودن ذرات و توزیع ابعادی مختلف نیز موجب کاهش ظرفیت فیلتراسیون و گرفتگی منافذ پارچه فیلتر می‌شود. با افزایش اندازه ذرات، چگالی کیک کاهش می‌یابد. وقتی چگالی کم‌تر می‌شود یعنی آب و یا هوا، جایگزین مواد جامد شده است. همچنین با افزایش دانه‌بندی، لوله‌های مویین بهتر تشکیل و آب‌گیری از کیک بیشتر و بهتر انجام می‌شود. میزان تفاوت فضای موجود بین ذرات ۱۰۵ و ۷۵میکرون نیز محسوس است. به‌طور خلاصه می‌توان تاثیر افزایش دانه‌بندی بر رطوبت را به‌ترتیب با دو عامل، تاثیر مثبت تشکیل لوله‌های مویین و تأثیر منفی افزایش آب موجود بین ذرات مرتبط دانست[۳۰].

۴-۶- اثر درصدجامد بر رطوبت

برای بررسی اثر درصدجامد پالپ بر رطوبت نهایی کنسانتره، آزمایش‌هایی در سه سطح ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درصد انجام شد. ابعاد ذرات نمونه ۱۰۵ میکرون، فشار خلاء ۶۰ کیلوپاسکال و زمان آب‌گیری ۲ دقیقه انتخاب شد(جدول ۶). در این آزمایش‌ها، برای ثابت نگه‌داشتن ضخامت کیک‌فیلتر، جرم کنسانتره خشک، ثابت گرفته شد و افزایش درصدجامد پالپ با کاهش مقدار آب صورت گرفت. در شکل ۷، مشاهده شد با افزایش درصدجامد پالپ از ۵۵ به ۶۰، رطوبت کیک فیلتر ۰٫۷ درصد کاهش یافت. این روند کاهشی با افزایش درصدجامد از ۶۰ به ۶۵ نیز ادامه یافت. با افزایش درصدجامد از ۵۵ به ۶۰، تخلخل کیک از ۳۴٪ به ۳۰٪ کاهش یافت. کاهش تخلخل همراه با کاهش رطوبت، نشان‌دهنده موثربودن نوع تخلخل و حاکی از خارج‌شدن آب از این منافذ است. با افزایش درصدجامد از ۶۰ به ۶۵، کاهش رطوبت اتفاق نیفتاد و تخلخل هم ثابت ماند که نشان‌دهنده غیرموثربودن نوع تخلخل کیک فیلتر و به دام‌افتادن آب در منافذ کیک است.

عموما اگر افزایش درصدجامد بر اثر افزایش جرم جامد خشک باشد، توان عملیاتی افزایش می‌یابد. وقتی که درصد جامد افزایش می‌یابد، ضخامت کیک تولیدی بر روی پارچه و آن مقاومت نیز افزایش می‌یابد. در ضخامت‌های زیاد، لایه‌ای که دورتر از سطح پارچه قرار دارد، کمتر تحت فشار خلاء قرار

می‌گیرد و درنتیجه رطوبتی که در آن باقی‌می‌ماند، افزایش می‌یابد. از طرفی می‌توان بیان کرد آب موجود در لایه‌های دورتر، مسیر دشوارتری برای عبور از کیک و پارچه فیلتر دارد که منجر به افزایش رطوبت می‌شود.

درصدجامد زیاد به‌شدت بر زمان و نرخ فیلتراسیون تاثیر می‌گذارد. افزایش زمان فیلتراسیون با افزایش درصدجامد را می‌توان به‌دلیل اغتشاش محیط و وجود مانع در مسیر عبور سیال از میان منافذ از یک‌سو و تشکیل سریع کیک و افزایش ضخامت آن از سوی دیگر دانست. کاهش درصد جامد منجر به کاهش ظرفیت عملیات می‌شود و در برخی موارد، به‌دلیل کاهش ضخامت کیک، جداشدن آن از سطح واسطه فیلتر با مشکل مواجه خواهد شد[۸].

پیش‌بینی دقیق اثر درصدجامد بر روی توان عملیاتی فیلتراسیون عملا ممکن نیست. باتوجه به اینکه ضخامت کیک فیلتر ثابت بوده، کاهش رطوبت کیک در اثر افزایش درصدجامد، بیشتر مربوط به کاهش مقدار آب موجود در پالپ است. در درصدجامدهای بالا، افزایش درجه برهم‌کنش ذرات، از ته‌نشینی برخی ذرات (به‌ویژه ذرات خیلی‌ریز)جلوگیری می‌کند و ایجاد تخلخل و پل‌سازی در ساختار کیک و افزایش کلی در تخلخل کیک را نتیجه می‌دهد[۵]. باتوجه به نزدیک‌بودن نتایج درصدجامد۶۰ و ۶۵ و هم‌چنین محدودیت تجهیزات انتقال مواد به‌ویژه در درصدجامدهای بالا، درصد جامد ۶۰ به‌عنوان غلظت بهینه در آزمایش‌ها انتخاب شد. این مقدار در تجهیزات انتقال مواد کارخانه بین ۵۵٪ تا ۶۰٪ است.

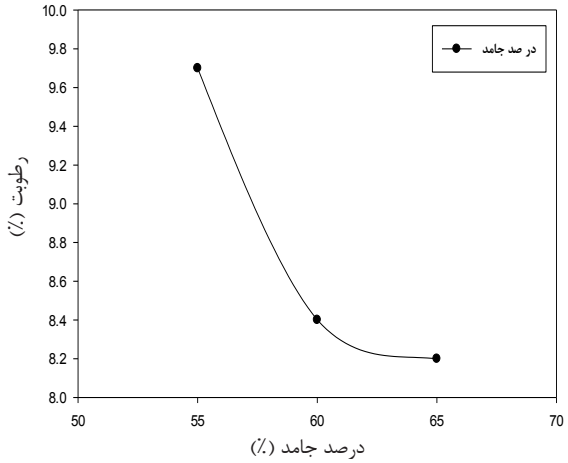
۴-۷- بررسی پارچه فیلترها

نتایج بررسی‌ها در جدول ۷ نشان‌داد یک نمونه از پارچه‌ها از جنس پلی پروپیلین(PP) با بافت جناغی و به‌صورت تک‌رشته‌ای است. نمونه دیگر از جنس پلی‌استر (PET) با الیاف چندرشته‌ای و دارای بافت فشرده است. وزن هر مترمربع نمونه‌ها، نشان داد پارچه فیلتر PET سبک‌تر از PP است.

افزایش فاصله روزنه‌های پارچه فیلتر منجربه عبور راحت‌تر مایع از آن در مرحله آبگیری می‌شود؛ به‌عبارت دیگر افزایش فاصله روزنه‌ها، سبب کاهش مقاومت پارچه می‌شود. درنتیجه هرچه روزنه‌ها فاصله بیشتری داشته باشند، رطوبت کیک تولیدی، کمتر خواهد بود. از طرفی با افزایش فاصله روزنه‌ها، کدورت فیلتریت افزایش و درنتیجه گرفتگی و کورشدگی چشمه‌های پارچه نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۶: نتایج بررسی اثر درصدجامد بر ویژگی‌های کیک

درصد جامد	رطوبت	تخلخل (%)
۵۵	۹٫۷	۳۴
۶۰	۸٫۴	۳۰
۶۵	۸٫۲	۳۰



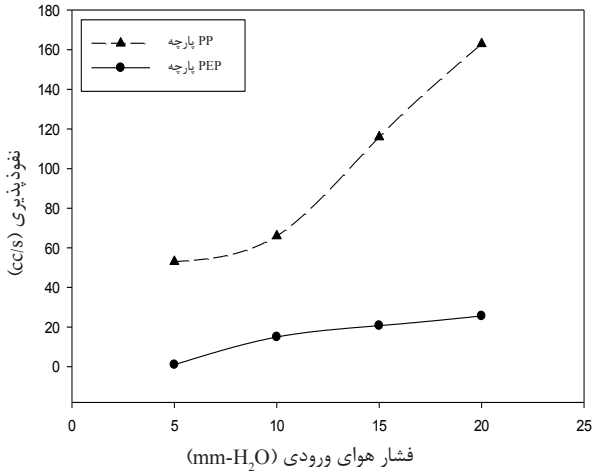
شکل ۷: اثر درصد جامد بر رطوبت کیک فیلتر

شکل ۸ نتایج آزمون نفوذپذیری هوا برای دو نوع پارچه PET و PP را نشان می دهد آزمون نفوذپذیری هوا از پارچه‌ها نشان‌داد که میزان نفوذپذیری هوا در پارچه pp نسبت به پارچه PET، بیشتر است که علت آن، می‌تواند به‌خاطر بافت تک‌رشته‌ای آن باشد. شکل ۹ بافت پارچه PET و شکل ۱۰ بافت پارچه PP را زیر میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد. بافت متراکم و چندرشته‌ای پارچه PET به‌گونه‌ای است که نوعی مانع در برابر عبور هوا محسوب می‌شود. عموما فاصله و شکل قرارگیری روزنه‌ها به‌ترتیب با میزان عبوردهی هوا و بافت پارچه بیان می‌شود. می‌توان گفت که بیشترین تاثیر مشخصات پارچه بر رطوبت، مربوط به بافت پارچه است. جنس پارچه‌ها عمدتا بر مقاومت آنها در مقابل اسید، باز، مواد شیمیایی‌خورنده و سایش موثر است. جنس پارچه در کورشدگی و گرفتگی پارچه نیز تاثیر قابل توجهی دارد، بنابراین بر رطوبت هم می‌تواند اثرگذار باشد.

آزمایش‌های فیلتراسیون نشان‌داد که رطوبت کیک در هر دو پارچه اختلاف ناچیزی داشت. زمان تشکیل کیک و حجم فیلتریت در زمان تشکیل کیک در جدول۸ نشان داده شده است. نتایج مشخص‌کرد زمان تشکیل کیک در پارچه PET

جدول ۷: مشخصات پارچه‌ها و نتایج آزمایش‌های فیلتراسیون

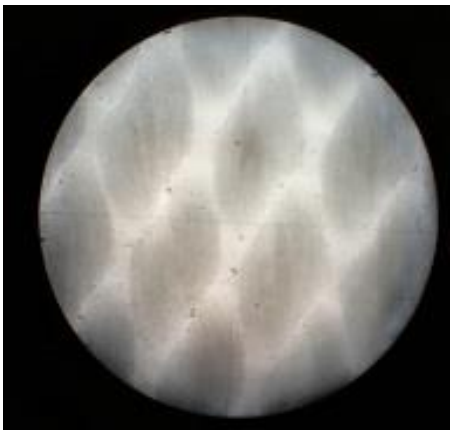
جنس پارچه	نوع بافت	وزن هر مترمربع (g/m^2)	رطوبت (%)	توان عملیاتی ($Kg/h.m^2$)
PP	جناغی تک رشته ای	۱۴۰۱	۹	۹۳۸
PET	ساده چندرشته‌ای	۱۳۶۲	۹٫۳	۱۰۳۶



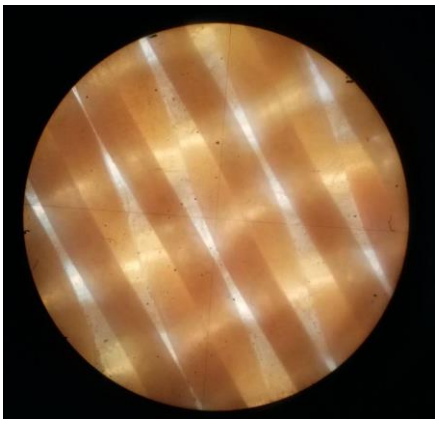
شکل ۸: نتایج آزمون نفوذپذیری هوا برای دو نمونه پارچه فیلتر

کمتر از پارچه PP است؛ درحالی‌که حجم فیلتریت در زمان تشکیل کیک، اختلاف ناچیزی باهم دارند. پارچه PET به‌خاطر بافت فشرده و چندرشته ای که دارد، موجب افزایش گرادیان فشار و تاثیر فشار خلاء بر آب‌گیری می‌شود. اگرچه انتظار می‌رود پارچه PP به‌دلیل بافت تک‌رشته‌ای و منافذ بزرگ‌تر نسبت به پارچه PET، آب را آسان‌تر از منافذ خود عبوردهد اما این خصوصیت باعث کاهش مقاومت سطح زیرین کیک شده و گرادیان فشار را کاهش خواهد داد.

اگر هدف از فیلتراسیون فقط رسیدن به‌حداقل مقدار رطوبت ممکن باشد؛ بهترین نتیجه با پارچه‌های PET با بافت جناغی فشرده و PP با بافت اطلسی فشرده حاصل می‌شود. چنان‌چه ظرفیت تولید نیز موردتوجه باشد، باتوجه به بافت فشرده این پارچه‌ها (که منجر به افزایش مقاومت پارچه می‌شود)، ظرفیت تولید نیز کاهش می‌یابد؛ بنابراین انتظار می‌رود که ضخامت کیک تشکیل‌شده بر روی پارچه فیلتر، کم باشد. در نتیجه باید پارچه فیلتری را انتخاب کرد که از نظر ظرفیت، قابل قبول



شکل ۹: پارچه PET با بافت چندرشته‌ای فشرده



شکل ۱۰: پارچه PP با بافت جناغی تک رشته‌ای

جدول ۸: اثر نوع پارچه به زمان و حجم فیلتریت تشکیل کیک

جنس پارچه	زمان تشکیل کیک (s)	حجم فیلتریت تشکیل کیک (ml)
PP	۵۰	۲۹۰
PET	۳۶	۳۰۰

باشد. زیادبودن ضخامت کیک تشکیل‌شده بر روی پارچه فیلتر، الزاما به‌معنای افزایش ظرفیت نیست؛ بلکه دلیل این مساله می‌تواند رطوبت زیاد بین فضای کیک یا وجود مواد رسی و متورم درکیک باشد. برای رفع این مشکل در بیان ظرفیت، می‌توان از توان عملیاتی استفاده کرد. کیفیت آب فیلتریت نیز حایز اهمیت است. اگر درصدجامد این آب بالا باشد، مشکلاتی را برای پمپ‌های انتقال آب ایجاد می‌کند؛ علاوه‌براین موجب کاهش ظرفیت مدار و هدرروی کنسانتره تولیدی می‌شود.

بالابودن کدورت آب و بازگرداندن آن به محیط زیست، باعث افزایش آلودگی می‌شود. اگر این آب به مدار کارخانه بازگردد با توجه به مواد معلق بسیار زیادی که همراه دارد، فرایندهایی مانند فلوتاسیون را که مبتنی بر انحلال مواد شیمیایی در آب کارخانه است، شدیدا تحت تاثیر قرار می‌دهد. نوع بافت پارچه و فشردگی آن در میزان کدورت آب عبوری نیز تاثیر غیرقابل انکاری دارد[۱۴]. بنابراین پارچه PET از نظر ظرفیت، توان عملیاتی و زمان تشکیل کیک، عملکرد بهتری نسبت به PP دارد.

۴-۸- بررسی استفاده از سطح‌سازها در فیلتراسیون

آزمایش‌های فیلتراسیون برای واکنش‌گرهای مختلف در غلظت‌های متفاوت انجام شد. سپس رطوبت، زمان تشکیل کیک و حجم فیلتریت در زمان تشکیل کیک بررسی شد. تمامی آزمایش‌های مرتبط با سطح‌سازها در شرایط بهینه فرایندی به‌صورت فشار خلاء ۶۰ کیلوپاسکال، زمان فیلتراسیون ۱۲۰ ثانیه، درصدجامد پالپ ۶۰٪، اندازه ذرات ۱۰۵میکرون و ضخامت کیک ۲ سانتی‌متر انجام شد.

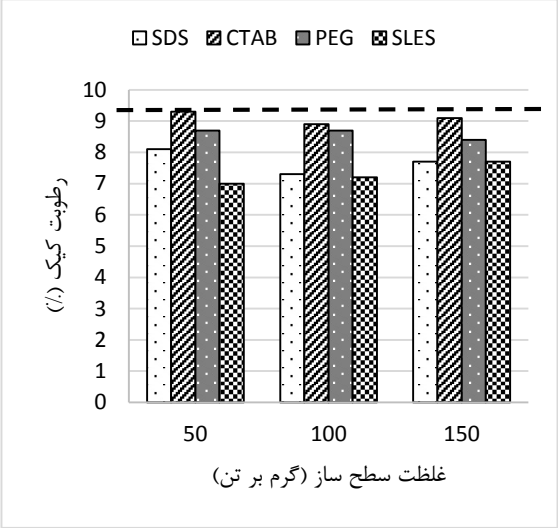
۴-۸-۱-تاثیر نوع و غلظت سطح‌ساز بر رطوبت کیک

نتایج آزمایش‌های فیلتراسیون با استفاده از سطح‌سازها و مقایسه آن با حالت بدون افزودنی در جدول ۹، نشان داده شده است. فعال‌کننده‌های سطح می‌توانند آب‌رانی را افزایش دهند. با افزایش زاویه تماس و به‌دنبال آن افزایش میزان آب‌رانی، نیروهای مویینگی و به‌دنبال آن، کاهش کشش سطحی می‌شود. معمولا طول زنجیره هیدروکربنی، تعیین‌کننده آب‌رانی نسبی فعال‌کننده‌های سطحی می‌شود و بااستفاده از فعال‌کننده آب‌ران‌تر، عملیات آب‌گیری بهتر صورت می‌گیرد[۲۹،۱۷]. پتانسیل زتای (ZPC[1]) مگنتیت در pH=۵/۷ برابر، صفر و در pHهای بالاتر، منفی است. در سطح‌ساز SDS تازمانی‌که گروه‌های سولفات، بار منفی دارند، دو سطح کانی یک‌دیگر را دفع می‌کنند و اثر دافعه بیشتر می‌شود. اما به‌خاطر جذب آب در گروه‌های آب‌دوست، نگه‌داری رطوبت توسط سطح کانی به تدریج افزایش می‌یابد. در حضور SDS، نقطه ایزوالکتریک مگنتیت در پایین‌ترین مقدار خود قرار می‌گیرد. در pH طبیعی، نیروهای دافعه بین یونی بر مقدار SDS که دارای شعاع هیدرودینامیکی بالایی هستند، تسلط دارند. بنابراین یک زنجیره نشاسته‌ای تولید می‌شود. عامل جذب بیشتر به‌خاطر مکانیزم پل‌زنی بین ذرات هم بار است. در جذب CTAB روی مگنتیت، به‌خاطر بار مثبت CTAB و بار منفی سطح مگنتیت، مکانیسم اصلی جذب، خنثی‌سازی بار است. مکانیسم جذب سطح‌سازهایSDS و PEG، غالبا پل‌زنی است؛ درحالی‌که مکانیزم جذب در CTAB، تقابل بارهای الکترواستاتیک و خنثی‌سازی است[۳۱]. با توجه به شکل ۱۱، نتایج نشان‌داد سطح‌ساز آنیونی SDS نسبت به سطح‌سازهای کاتیونی و غیریونی عملکرد بهتری داشته و در غلظت ۱۰۰ گرم‌برتن، باعث کاهش ۲درصدی رطوبت کیک فیلتر شده است. به‌منظور مقرون به‌صرفه‌بودن استفاده از SDS در مدار آب‌گیری، نمونه صنعتی آن با نام سدیم لوریل اتر سولفات(SLES) تهیه شد. SLES همان نمونه صنعتی سطح‌ساز SDS است که اصطلاحا اتوکسیله شده است. اتوکسیلاسیون، فرایندی است که در آن مولکول‌های اتیلن اکسید به اسیدهای چرب افزوده می‌شوند.

جدول ۹: اثر سطح‌سازها برشاخص‌های عملیاتی فیلتراسیون

	بدون افزودنی	SDS	CTAB	PEG	SLES	SDS	CTAB	PEG	SLES	SDS	CTAB	PEG	SLES
غلظت	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
زمان تشکیل کیک(s)	۴۵	۳۹	۳۹	۳۷	۴۶	۴۵	۴۵	۳۸	۴۰	۴۱	۴۲	۳۶	۴۴
حجم فیلتریت در زمان تشکیل کیک (ml)	۲۸۵	۲۹۲	۲۶۴	۲۵۵	۲۸۸	۳۱۲	۲۵۷	۲۶۶	۲۹۸	۳۱۰	۲۶۰	۲۵۴	۲۸۴
رطوبت	۹/۲	۸/۱	۹/۳	۸/۷	۷	۷/۳	۸/۹	۸/۷	۷/۲	۷/۷	۹	۸/۴	۷/۷
توان عملیاتی (Kg/m2h)	۹۶۲	۱۰۲۹	۱۰۷۵	۱۰۸۹	۱۰۱۰	۹۶۹	۱۰۱۳	۱۰۴۹	۹۸۹	۱۰۶۷	۱۰۴۰	۱۰۲۹	۹۶۸
نسبت توان عملیاتی به رطوبت	۱۰۵	۱۲۵	۱۱۶	۱۲۵	۱۲۹	۱۳۳	۱۱۴	۱۲۱	۱۳۷	۱۳۹	۱۱۶	۱۲۳	۱۲۷

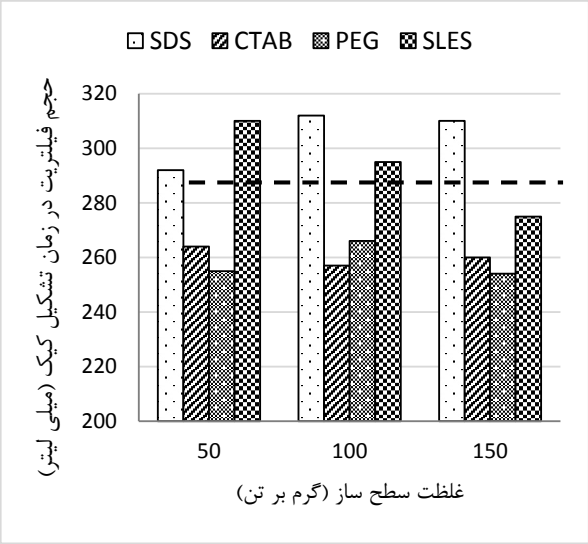
اتیلن اکساید از گروه الکل‌ها است و باعث افزایش آب‌دوستی ماده و انحلال‌پذیری آن می‌شود. به‌همین‌خاطر این ماده در آب‌های سخت (آب مورد استفاده در کارخانه‌های فراوری) نیز از انحلال‌پذیری بالایی برخوردار است. این ماده با نام تجاری "تگزاپون"، یکی از مواد پایه در تولید شوینده‌ها است که به‌وفور در داخل کشور تولید می‌شود و ارزان‌تر از SDS آزمایشگاهی است. برای مقایسه اثر SDS آزمایشگاهی و SLES صنعتی بر رطوبت و توان عملیاتی، آزمایش‌های فیلتراسیون در غلظت‌های ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرم برتن با سطح‌ساز SLES انجام شد. نتایج نشان‌داد کارایی این ماده در کاهش رطوبت کیک‌فیلتر در غلظت ۷۵ گرم برتن، مشابه کارایی SDS در غلظت ۱۰۰ گرم برتن است. بنابراین سطح‌ساز SLES، به‌دلیل بیشترین کاهش رطوبت به میزان ۲٪ و نیز ارزان‌تر و در دسترس‌بودن، به‌عنوان کمک فیلتر نهایی و غلظت ۷۵ گرم برتن، به‌عنوان غلظت بهینه انتخاب شد.



شکل ۱۱: رطوبت کیک فیلتر در حضور سطح‌سازها

۴-۸-۲-تاثیر سطح‌ساز بر حجم فیلتریت در زمان تشکیل کیک

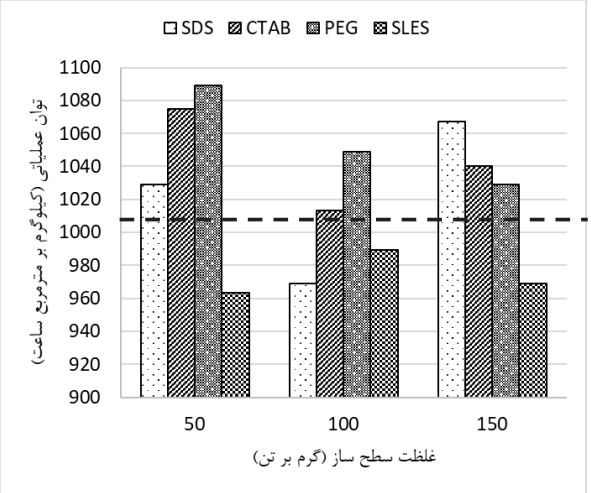
نتایج این بررسی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. براساس جدول، زمان تشکیل کیک در غلظت ۵۰ و ۱۰۰ گرم بر تن برای سه نوع سطح‌ساز تقریبا یکسان است، اما میزان فیلتریت جمع‌آوری‌شده برای سطح‌ساز SDS نسبت به سایر سطح‌سازها بیشتر است. درشکل ۱۲، نمودار حجم فیلتریت بر حسب غلظت سطح‌ساز، به‌خوبی نشان می‌دهد که با افزودن سطح‌ساز SDS به پالپ، عملیات آب‌گیری آسان و حجم بیشتری از آب در زمان تشکیل کیک خارج شده است. حالت بدون افزودنی با خط منقطع نشان داده شده است.



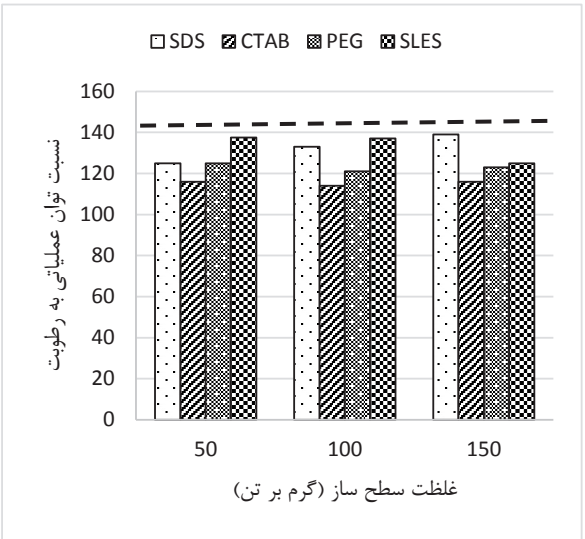
شکل ۱۲: حجم فیلتریت در زمان تشکیل کیک در حضور سطح‌سازها

۴-۸-۳- تاثیر سطح‌ساز بر توان عملیاتی فیلتراسیون

شکل ۱۳ توان عملیاتی فیلتراسیون در غلظت‌های مختلف سطح‌سازها را نشان می‌دهد. براساس رابطه شماره۲، توان عملیاتی با وزن کیک‌خشک، رابطه مستقیم و با زمان کل آب‌گیری، رابطه معکوس دارد. اگرچه در شکل ۱۳، توان عملیاتی SDS کمتر از سایر سطح‌سازها است اما باتوجه به میزان کاهش رطوبت و تاثیر مستقیمی که SDS بر راندمان آب‌گیری دارد، می‌توان برای مقایسه بهتر، از شاخص نسبت توان عملیاتی به رطوبت استفاده کرد. هدف از فیلتراسیون، دستیابی به بیشینه توان عملیاتی هم‌زمان با کمترین رطوبت است. نسبت توان عملیاتی به‌رطوبت، بیان‌گر شاخصی است که هرچه مقدار آن بیشتر باشد، کارایی عملیات فیلتراسیون مطلوب‌تر ارزیابی می‌شود. در جدول ۹، مشاهده می‌شود که بیشترین مقادیر این شاخص، متعلق به سطح‌ساز SDS است. شکل ۱۴، تغییرات این شاخص برای سطح‌سازها در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در غلظت ۱۰۰ گرم برتن SDS که کمترین میزان رطوبت در کیک فیلتر به‌دست آمد، این شاخص برابر ۱۳۳ و نسبت به سایر سطح‌سازها و حالت بدون افزودنی،



شکل ۱۳: تاثیر سطح‌سازها بر توان عملیاتی فیلتراسیون



شکل ۱۴: نسبت توان عملیاتی فیلتراسیون به رطوبت در حضور سطح‌سازها

بیشترین مقدار در این غلظت است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور افزایش کارایی آسیای غلتکی فشاربالای انتهای خط در افزایش بلین کنسانتره مگنتیت، امکان کاهش رطوبت کیک‌فیلتر خلاء نواری خط ۵ و۶ شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، بررسی شد. این مهم با بررسی و بهینه‌سازی معیارهای فرایندی و استفاده از سطح‌سازها انجام شد. برای این منظور آزمایش‌های فیلتراسیون در سطوح مختلف عوامل موثر در فرآیند و با سطح‌سازهای متنوع صورت‌گرفت. نتایج آزمایش های اولیه فیلتراسیون نشان‌داد که شاخص‌های اندازه ذرات، فشار خلاء، زمان آب‌گیری و درصدجامد پالپ بر کاهش رطوبت کیک‌فیلتر موثر هستند. آزمایش‌های فیلتراسیون با افزودن سطح‌ساز به پالپ نیز نشان داد، استفاده از سطح‌ساز بر کاهش رطوبت کیک‌فیلتر موثر است. کمترین مقدار رطوبت کیک فیلتر در اندازه ذرات ۱۰۵ میکرون، فشار خلاء ۶۰ کیلوپاسکال، زمان آب‌گیری ۱۲۰ ثانیه و درصدجامد ۶۰٪ به‌دست آمد. آزمایش‌های پارچه فیلتر نشان‌داد کارایی پارچه فیلتر PET نسبت به PP ، به‌دلیل کوتاه‌تربودن زمان تشکیل کیک و حجم بیشتر فیلتریت، در کاهش رطوبت کیک موثرتر است. نتایج آزمایش‌های سطح‌سازها نشان‌داد سطح‌ساز آنیونی SDS در غلظت ۱۰۰ گرم‌برتن رطوبت کیکی فیلتر را ۲ درصد کاهش می‌دهد که نسبت به نوع کاتیونی و غیریونی، کارایی بیشتری دارد. سطح‌ساز SLES، نمونه صنعتی SDS است که در غلظت ۷۵ گرم‌برتن، رطوبت کیک را ۲٪ کاهش داد. باتوجه به‌این‌که هدف از فیلتراسیون، دستیابی به کمترین رطوبت و بیشترین توان عملیاتی است، از شاخص نسبت توان عملیاتی به رطوبت استفاده شد و این شاخص برای SDS و SLES به‌ترتیب در غلظت‌های ۱۰۰ و ۷۵ گرم‌برتن، بیشترین مقدار به‌دست آمد. SLES به‌دلیل ارزان‌تر و در دسترس‌بودن و کارایی بیشتر نسبت به SDS و سایر سطح‌سازها، به‌عنوان سطح‌ساز مناسب برای استفاده در کمک‌فیلتر و غلظت ۷۵ گرم برتن، غلظت بهینه انتخاب شد.

۶- سپاس‌گزاری

نویسندگان برخود لازم می‌دانند از تمامی کارکنان پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل‌گهر و شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر که در انجام این تحقیق، همکاری صمیمانه‌ای داشته اند، تشکر و قدردانی کنند.

۷- مراجع

[۱] زارع قاجاری، م.، حجازی، ر.، سقائیان، م.؛ ۱۳۹۵؛ "**بررسی تفصیلی شاخص اشباع‌شوندگی و تأثیر آن بر عملکرد آسیای غلتکی فشاربالا**". گزارش پروژه، شرکت مهندسی فکور صنعت تهران.

[2] Mular, A. L., Halbe, D. N., and Barratt, D. J. (Eds.) (2002). *"Mineral processing plant design, practice, and control":* proceedings, SME, 1: 1289-1294.

[3] Silverblatt, C. E., and Easton, J. H. (2002).

"Characterization of process objectives and (general) approach to equipment selection". Mineral Processing Plant Design Practice and Control, 1255-1261.

[۴] سایت سازمان علمی و آموزشی فرادرس، ایران، www.faradars.org.

[5] Besra, L., Sengupta, D. K., and Roy, S. K. (2000). *"Particle characteristics and their influence on dewatering of kaolin, calcite and quartz suspensions"*. International Journal of Mineral Processing, 59(2): 89-112.

[۶] دریکوند، س.، عبداله زاده، ع.؛ ۱۳۹۳؛ "**بررسی تأثیر pH بر روی کاهش رطوبت کیک فیلتر کنسانتره دانه‌ریز روی باما**". پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، ص ۹۵۷-۹۵۲..

[7] Day, A., Briggs, D., and Bruey, F. (2002). *"Mining Chemicals Handbook"*. Revised Edition, CYTEC, Horton Printing Company, Meriden, CT.

[8] Wang, L. F., He, D. Q., Tong, Z. H., Li, W. W., and Yu, H. Q. (2014). *"Characterization of dewatering process of activated sludge assisted by cationic surfactants"*. Biochemical Engineering Journal, 91: 174-178.

[۹] ایرانمنش، ا.، بنیسی، ص.؛ ۱۳۸۳؛ "**بررسی تأثیر افزایش کمک فیلتر برکارایی عملیات فیلتراسیون کارخانهٔ زغال‌شویی زرند**". کنفرانس مهندسی معدن ایران، ص ۹-۱.

[10] Silverblatt, C. E., and Easton, J. H. (2002). *"Characterization of Process Objective and Approach to Equipment Selection"*. WesTech Engineering, Inc, Salt Lake City, Utah.

[۱۱] عرب زاده، س.؛ ۱۳۹۱؛ "**بهبود کارآیی مدار فیلتراسیون کارخانه فرآوری شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی.

[۱۲] پالدی، ی.؛ ۱۳۹۳؛ "**انتخاب و طراحی سیستم آب‌گیری در شرایط افزایش عیار آهن کنسانتره و تولید خوراک فرآیند گندله‌سازی در خط چهار مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی.

[۱۳] اسماعیلی، ن.؛ ۱۳۹۳؛ "**تعیین پارامترهای موثر بر فیلترشوندگی باطله کارخانه‌های فرآوری گل‌گهر**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، دانشکده فنی و مهندسی.

[۱۴] ایزدی، م.؛ ۱۳۹۴؛ "**بررسی و عیب‌یابی مدار فیلتراسیون کارخانه بازیابی هماتیت مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، دانشکده فنی و مهندسی.

[۱۵] مام قادری، ح.، ممی پور، ا.، مقیسه، م.، قراباغی، م.؛ ۱۳۹۴؛ "**تعیین نوع پارچه مناسب برای فیلتراسیون باطله‌های سنگ آهن با استفاده از فیلترخلاء دیسکی**". کنفرانس بین المللی مهندسی معدن، فلزات و مواد، تهران، موسسه اطلاع رسانی نارکیش.

[۱۶] مام قادری، ح.، قراباغی، م.، نوع‌پرست، م.؛ ۱۳۹۵؛ "**بررسی پارامترهای موثر بر فیلترشوندگی باطله‌های کارخانه سنگ آهن به روش فیلتراسیون فشاری**". سمینار تخصصی فرآوری مواد معدنی، تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

[17] Singh, B. P. (1997). *"The influence of surface phenomena on the dewatering of fine clean coal"*. Filtration & Separation, 34(2): 159-163.

[18] Singh, B. P., and Besra, L. (1997). *"The effect of flocculants and surfactants on the filtration dewatering of iron ore fines"*. Separation Science and Technology, 32(13): 2201-2219.

[19] Lihong, D. U., and Wenping, L. I. (2011). *"A Study on Enhancement of Filtration Process with Filter Aids Diatomaceous Earth and Wood Pulp Cellulose"*. Chinese Journal of Chemical Engineering, 792-798.

[20] Haselhuhn, H. J., Swanson, K. P., and Kawatra, S. K. (2012). *"The effect of CO2 sparging on the flocculation and filtration rate of concentrated hematite slurries"*. International Journal of Mineral Processing, 107-109.

[21] Wang, L. F. (2014). *"Characterization of dewatering process of activated sludge assisted by cationic surfactants"*. Biochemical Engineering Journal, 174-178.

[۲۲] ملایجردی، ع.؛ ۱۳۸۷؛ "**بررسی راه‌های افزایش کارایی مدار فیلتراسیون مجتمع معدنی و صنعتی چادرملو**". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی.

[23] Liu, L., Wu, F., and Tan, W. (2016). "*Effect of cetyl trimethyl ammonium bromide on shrinkage cracks in filter cakes during pressure filtration of iron ore concentrates"*. Powder Technology, 297: 239-246.

[24] Mamghaderi, H., Gharabaghi, M., and Noaparast, M. (2018). *"Optimization of role of physical parameters in the filtration processing with focus on the fluid flow from pore"*. Minerals Engineering, 122: 220-226.

[25] Ejtemaei, M., Ramli, S., Osborne, D., and Nguyen, A. V. (2019). *"Synergistic effects of surfactant-flocculant mixtures on ultrafine coal dewatering and their linkage with interfacial chemistry"*. Journal of Cleaner Production.

[26] Kopparthi, P., Sachinraj, D., Charan, T. G., and Mukherjee, A. K. (2019). *"Optimization of surfactant-aided coarse coal dewatering process in a pilot-scale centrifuge"*. Powder Technology, 349: 12-20.

[27] Ni, L. A., Yu, A. B., Lu, G. Q., and Howes, T. (2006). *"Simulation of the cake formation and growth in cake filtration"*. Minerals Engineering, 19(10): 1084-1097.

[28] Tarleton, S., and Wakeman, R. (2011). *"Solid/Liquid Separation: Scale-up of Industrial Equipment"*. Elsevier.

[29] Wills, B. A., and Finch, J. (2015). *"Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery"*. Butterworth-Heinemann.

[30] Sparks, T. (2012). *"Solid-liquid filtration: Understanding filter presses and belt filters"*. Filtration & Separation, 49(4): 20-24.

[31] Patra, A. S., Makhija, D., Mukherjee, A. K., Tiwari, R., Sahoo, C. R., and Mohanty, B. D. (2016). *"Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants"*. Powder Technology, 287: 43-50.

[1] Zeta Potential Charge

Imam Khomeini International University
Vol. 5, No. 2, Summer 2020, pp. 30-32

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/jmre.2019.11194.1290

Increasing the Efficiency of Vacuum Belt Filter in Gol-E-Gohar Mining Industrial Company Using Process-Based Parameters

Azargoon Jahromi A.[1], Naderi H.[2*], Gharedaghi M.[3]

1- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Mining and metallurgy, Yazd Uiniversity, Yazd, Iran
Ahmad.azargoon@gmail.com

2- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Mining and metallurgy, Yazd Uiniversity, Yazd, Iran
Naderi@yazd.ac.ir

3- Senior Expert of Mineral Processing, Gol-e-gohar Mineral and Industrial Company,Sirjan, kerman, Iran
m.qaredaqi@gmail.com

(Received: 18 Jul. 2019, Accepted: 02 Oct. 2019)

Abstract: In Lines 5 and 6 of Gol Gohar Mineral and Industrial Complex the special surface of concentrate (Blain) is increased by the high pressure grinding rolls equipment (HPGR). At present, due to changes in the input feed of the plant, the magnetite concentrate moisture has increased. Increasing the moisture content of the material will reduce the HPGR operational gap, thereby reducing the feed rate and the effective pressure on the particles. As a result, Blain Concentrate will not be desirable. After checking of the process, it was determined that the parameters of vacuum pump pressure, filtration time, solid particle size and solid pulp percentage were effective on the filtering process. For this purpose, filtration experiments were carried out at different levels of each of the above parameters. In this research, four types of surfactants SDS, PEG, CTAB and SLES were used to study their effect on moisture reduction and filtration process. The results showed that the optimal conditions of the process parameters to achieve the minimum moisture content is 60 Kpa operating pressure, optimum dewatering time was 120 seconds, particle size 105 microns, proportional to the separation of Hydrocyclones and 60% solids content of pulp proportional to transfer equipment. Surfactant experiments showed that by adding 100 g/t anionic surfactant SDS to the pulp, the filter cake moisture content was reduced by 2%. The SDS increased filtration efficiency by decreasing the time of forming the filter cake and increasing the filtrate volume, especially at the time of forming the cake. The use of SDS improves filtration performance by increasing the ratio of throughput to moisture. At a concentration of 100 g/ton SDS and SLES, the lowest moisture of filter cake and the highest throughput was achieved. The ratio of throughput to moisture content for SDS was highest compared to other surfactants. SLES was selected with the same results as SDS at a concentration of 75 g/t, and because of its cost-effectiveness and availability, it was chosen as the final filter aid.

Keywords: Horizontal belt filter, Cakefilter, Surfactant, Blain, Filtration.

INTRODUCTION

At line 5 and 6 of Gol Gohar Magnetite Concentrate Production Plant, the concentrate is dewatered by belt filter and then inserted into HPGR to increase blain. The high moisture content of the filter cake causes HPGR to function, reducing blain. In this study, the effect of process parameters on belt filters was investigated. Anionic (SDS, SLES), cationic (CTAB) and non-ionic (PEG) surfactants were used to investigate the effect of surfactants application on filter cake moisture. In this study, vacuum filtration experiments were performed using a top feed method. The obtained results include the optimum values of process parameters and the type of surfactant and its optimum concentration to reduce the moisture content of the filter cake.

METHODS

The filtration experiments were performed using the Buchner funnel connected to the vacuum pump and the scaled cylinder. In this method, solid separation from the liquid occurs by the pressure difference created by the vacuum pump on both sides of the filter media. The liquid that is separated and passed through the filter media is called filtrate. The remaining solid at the top of the filter media is called filter cake. In this method, the vacuum pressure at the values of 30, 40 and 50 KPa, dewatering time at the values of 60, 90 and 120 seconds, the particle size in two fractions of 75 and 105 micron, and the percentage of solid pulp at the values of 55, 60 and 65 percent were investigated. The surfactant solution was prepared at a concentration of 1 g/L and then added to the pulp at concentrations of 50, 100 and 150 gr/ton.

FINDINGS AND ARGUMENT

The results of the process parameter tests showed that the optimum value for vacuum pressure was 60 kPa according to the pump power. The particle size suitable for the filtration feed was 105 microns based on the performance of the hydrocyclones. The optimum solid percentage for pulp was 60% due to the limitations of pulp transfer equipment. To determine effective surfactant, the parameters of filter cake moisture, filtrate volume at cake formation time, throughput and the ratio of throughput to filter cake moisture were investigated[1].

Results of surfactants tests presented in the Table 1. Filter cake moisture decreased when all three type surfactants were used, however anionic surfactants (SDS and SLES) reduced cake moisture more than others (2%) because of increasing contact angle and decreasing surface tension[2]. The volume of filtrate increased significantly in the presence of anionic surfactants, with the highest amount occurring at concentrations of 50 and 100 g/t. The throughput increased with the use of cationic and non-ionic surfactants, However, this index could not be definitively set t*o detect filtration performance*. The purpose of filtration is to achieve the lowest moisture content and the highest throughput, so the ratio of throughput to moisture content for each surfactant was investigated. The results showed that this ratio is higher for anionic surfactants than others. Finally, the effect of anionic surfactants (SDS, SLES) was higher among cationic and nonionic

Table 1. Effect of surfactants on operational parameters of filtration

	Non additive	SDS	CTAB	PEG	SLES	SDS	CTAB	PEG	SLES	SDS	CTAB	PEG	SLES
Concentration (g/t)	0	50	50	50	50	100	100	100	100	150	150	150	150
Cake formation time (s)	45	39	39	37	46	45	45	38	40	41	42	36	44
Filtrate volume in cake formation time (ml)	285	292	264	255	288	312	257	266	298	310	260	254	284
Moisture (%)	9.2	8.1	9.3	8.7	7	7.3	8.9	8.7	7.2	7.7	9	8.4	7.7
Throughput (Kg/m^2h)	962	1.29	1.75	1089	1010	969	1013	1049	989	1067	1040	1029	968
Throughput / Moisture	105	125	116	125	129	133	114	121	137	139	116	123	127

surfactants and decreased filter cake moisture by 2%. SLES surfactant was selected as filter aid due to its lower cost than SDS surfactant and its optimum concentration was 75 gr / ton.

CONCLUSIONS

In this study, optimization of process parameters of tape filters was performed. The type and concentration of surfactant suitable for use as filter aid was determined. The results showed that vacuum pressure, filtration time, particle size, and pulp solid content were effective in reducing the moisture content of the filter cake. Surfactants increase filtration efficiency and decrease moisture by increasing contact angle and decreasing surface tension. The results showed that anionic surfactants are suitable for filtration of magnetite concentrate and have the most effect on reducing the moisture content of filter cake. Therefore, it was suggested to use SLES surfactant as filter aid in dewatering circuit.

REFERENCES

[1] Mamghaderi, H., Gharabaghi, M., and Noaparast, M. (2018) . *"Optimization of role of physical parameters in the filtration processing with focus on the fluid flow from pore".* Minerals Engineering, 122: 220-226.

[2] Patra, A. S., Makhija, D., Mukherjee, A. K., Tiwari, R., Sahoo, C. R., and Mohanty, B. D. (2016). *"Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants".* Powder Technology, 287: 43-50.