نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره یازدهم، شماره ۳۱، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۶۷تا۷۹
Vol.11, No. 31, 2016,pp67-79

بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فیلترشوندگی نمونه ترکیبی باطله کارخانه‌های فرآوری گل-گهر با استفاده از دستگاه فیلتر فشاری

نادر اسمعیلی[۱]؛ محمدرضا خالصی[۲*]؛ ابراهیم پناهی[۳]؛ احمد خدادادی دربان[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، naderesmaeili.tmu@gmail.com
۲- استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، mrkhalesi@modares.ac.ir
۳- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، پروژه بازیابی آب، شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، e.panahi@golgohar.com
۴- دانشیار فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، Akdarban@modares.ac.ir

(دریافت ۲۰ بهمن ۱۳۹۳، پذیرش۶ آبان ۱۳۹۴)

چکیده

در تحقیق حاضر، به بررسی عوامل مؤثر بر فیلترشوندگی باطله‌های تر دو کارخانه فرآوری تغلیظ مگنتیت و بازیابی هماتیت شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، با استفاده از دستگاه فیلترپرس محفظه‌ای- غشایی پرداخته شده است. پس از انجام مطالعات کتابخانه‌ای و در نظر گرفتن محدودیت‌های فرآیندی، ۱۰ فاکتور *pH* پالپ، افزودن کمک فیلتر، افزودن فلوکولانت، درصد جامد پالپ، نوع پارچه فیلتر، زمان و فشار مرحله فشرده‌سازی، زمان و فشار مرحله دمیدن هوا و ضخامت محفظه به‌عنوان عوامل تأثیر گذار بر فرآیند فیلتراسیون شناخته شد و طی آزمایش‌های اولیه، آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش و آزمایش‌های طراحی شده بررسی شدند. پس از شناخت عوامل مؤثر بر میزان رطوبت نهایی و نیز توان عملیاتی، بهینه‌سازی عوامل با سه هدف کمینه شدن رطوبت برای انباشت آسان باطله‌ها، بیشینه شدن توان عملیاتی برای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی و بهینه شدن هر دو پاسخ انجام شد و توسط آزمایش‌های اعتبارسنجی مقادیر بهینه شده راستی‌آزمایی شدند. نتیجه آن، رطوبت ۱۴/۳۲ درصد برای حالت بهینه رطوبت، توان عملیاتی ۰/۲۷ تن بر ساعت بر متر مربع برای حالت بهینه توان عملیاتی و رطوبت ۱۷ درصد و توان عملیاتی ۰/۱۴۷ تن بر ساعت بر متر مربع برای حالت بهینه هر دو پاسخ بود. همچنین برای بزرگ مقیاس کردن این نتایج، آزمایش تکمیلی دیگری در شرایط بهینه و توان عملیاتی در مقیاس نیمه‌صنعتی اجرا شد.

کلمات کلیدی

فیلتراسیون، باطله، فیلترپرس، بهینه‌سازی، گل‌گهر، رطوبت، توان عملیاتی

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

با توجه به لزوم استفاده از روش‌های تر، صنعت فرآوری مواد معدنی از جمله مهم‌ترین صنایع مصرف‌کننده آب است. به‌خصوص با در نظر گرفتن این موضوع که در کشور ما اغلب کارخانه‌های بزرگ فرآوری مواد معدنی در مناطق کویری و کم آب حادث شده‌اند، لزوم و اهمیت استفاده بهینه از آب و بازیافت آن تا حد امکان، دو چندان می‌شود. آب توسط تیکنرها، فیلترها و نیز سدهای باطله بازیابی می‌شود و بنابراین کارایی هر چه بیشتر هر یک از این فرآیندها، بر بازیابی آب صنایع فرآوری مواد معدنی تأثیرگذار است.

فیلتراسیون به‌عنوان یکی از فرآیندهای مهم در بازیابی آب، یک عملیات واحد است که طی آن، ذرات معلق جامد از مایع جدا می‌شوند. اگر چه برنامه‌های کاربردی و صنعتی این عملیات به‌طور قابل‌توجهی وسیع و متفاوت هستند، با این حال اساس کار تمام دستگاه‌های فیلتراسیون؛ عبور مایع و یا پالپ از داخل غشاء متخلخل و یا واسطه بوده که بر اساس آن ذرات جامد روی سطح واسطه و یا در داخل خلل و فرج آن باقی مانده، در حالی که سیال به‌عنوان محلول صاف‌شده (فیلتریت)، از آن عبور می‌کند [۱].

هدف اصلی در فیلتراسیون تولید کیک با حداقل رطوبت و حداکثر توان عملیاتی (نرخ جامد تولیدی در واحد سطح) است [۲]. از جمله عوامل تأثیرگذار بر خاصیت فیلترشوندگی پالپ می‌توان به توزیع دانه‌بندی ذرات، درصد جامد پالپ، تغییر اندرکنش‌های بین ذره‌ای با تغییر pH، استفاده از کمک فیلتر، فشرده‌سازی کیک، بهینه‌سازی زمان سیکل و غیره اشاره کرد [۳-۵].

۱-۱- اهمیت موضوع تحقیق

در حال حاضر جریان‌های باطله خروجی از دو کارخانه تغلیظ مگنتیت و بازیابی هماتیت مجتمع صنعتی و معدنی گل‌گهر وارد حوضچه باطله می‌شوند. با توجه به این‌که جریان باطله ورودی به حوضچه باطله از کارخانه تغلیظ مگنتیت درصد جامد ۴۵ درصد و تناژ جامد ۱۸۰ تن بر ساعت دارد و جریان باطله ورودی به حوضچه باطله از کارخانه بازیابی هماتیت درصد جامد حدود ۴۰ درصد و تناژ ۱۲۰ تن بر ساعت دارد، میزان آبی که از طریق این دو کارخانه وارد سد باطله می‌شود حدوداً ۴۰۰ متر مکعب بر ساعت است. بازیابی این مقدار آب، قبل از ورود به حوضچه باطله، علاوه بر تأمین بخشی از آب مصرفی کارخانه‌ها، از مشکلات ذخیره سازی باطله‌ها به‌صورت پالپ (به دلیل توپوگرافی منطقه) و همچنین خسارت‌های زیست‌محیطی ناشی از مواد همراه این باطله‌ها در حوضچه‌های باطله نیز جلوگیری می‌کند. از این رو شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان در نظر دارد با احداث کارخانه بازیابی آب، ته‌ریز تیکنر دو کارخانه تغلیظ مگنتیت و بازیابی هماتیت را به‌وسیله تیکنر نرخ بالا[1] و پس از آن به روش فیلتراسیون آب‌گیری کند. در تحقیق حاضر به تعیین و بررسی عوامل مؤثر بر فیلترشوندگی باطله ترکیبی این دو کارخانه پرداخته شده است.

۱-۲- انتخاب دستگاه مناسب

عرب‌زاده و همکاران در تحقیقی که روی همین نمونه انجام شد؛ به بررسی و مقایسه فیلتراسیون به روش خلأ و روش فشاری پرداخته و امکان استفاده از سیستم فیلتراسیون خلأ را به‌دلیل رطوبت بالای فیلتر کیک مناسب ندانسته‌اند [۶]. بنابراین برای انجام این تحقیق از دستگاه فیلترپرس استفاده شد که از مزایای آن نسبت به دستگاه فیلتر خلأ می‌توان به امکان فیلتراسیون مواد ریز دانه و تراکم‌پذیر، کاهش حداکثری رطوبت کیک فیلتر، امکان استفاده برای ظرفیت عملیاتی بالا و همچنین امکان افزایش ظرفیت دستگاه با اضافه کردن صفحات فیلتر، کنترل اتوماتیک دستگاه و همچنین نصب، تعویض و شست‌شوی آسان پارچه فیلترها اشاره کرد. هزینه سرمایه‌ای بالا از عمده‌ترین معایب فیلترپرس است [۵].

دستگاه مورد استفاده برای اجرای آزمایش‌ها، فیلترپرس آزمایشگاهی لابکس[2]، ساخت شرکت لارکس بود. شکل ۱ تصویری از این دستگاه را (که برای اجرای این پروژه تحقیقاتی مونتاژ شد) به‌همراه تجهیزات همراه آن (میکسر، پمپ، مقسم هوای فشرده و تقویت کننده فشار) نشان می‌دهد.

شکل ۱: تصویر مجموعه دستگاه‌های آزمایشگاهی فیلترپرس

۱-۳ - مراحل عملیاتی فیلترپرس

اصلی‌ترین مراحل یک فرآیند فیلترپرس عبارتند از: مرحله خوراک‌دهی[3]، که طی آن پالپ توسط پمپ به داخل دستگاه

پمپ می‌شود. مرحله فشرده‌سازی یا چلاندن[۴]، که طی این مرحله هوای فشرده یا آب تحت فشار پشت دیافراگم یا غشاء اعمال شده و باعث فشرده شدن کیک می‌شود. مرحله دمیدن هوا یا خشک کردن[۵]، در این مرحله هوای فشرده به داخل کیک اعمال می‌شود تا باعث حذف بیشتر رطوبت کیک شود. در نهایت تخلیه کیک و شستشوی پارچه آخرین مراحل فرآیندی فیلترپرس می‌باشند. برای فیلتر کردن موادی که در آن‌ها محلول فیلتریت به‌عنوان ماده با ارزش باشد مانند محلول‌های لیچینگ، یا زمانی که فیلتر کیک حاوی مواد مزاحم قابل انحلال باشد، مراحل شستشو و فشرده‌سازی ثانویه نیز قبل از مرحله دمیدن هوا به این مراحل اضافه می‌شود [۵].

۱-۴ - مطالعات پیشین

تعدادی از مطالعاتی که تا به حال در زمینه تعیین عوامل مؤثر بر فیلتراسیون اسلاری انجام شده‌اند در جدول ۱ ارائه شده است. به جز تحقیق آقای تاونسند[۶] [۵] که به بررسی پارامترهای دستگاهی فیلترپرس پرداخته است بقیه کارها با استفاده از سیستم‌های فیلتراسیون خلأ بوده و تحقیق حاضر از اولین کارهایی است که در ایران با دستگاه فیلترپرس محفظه-ای غشایی انجام شده است.

جدول ۱: تحقیقات انجام‌شده در زمینه فیلتراسیون [۲-۹]

ردیف	محقق	موضوع تحقیق	سال انجام تحقیق
۱	*L. Besra & B.P. Singh*	بررسی تأثیر سطح‌سازها بر فرآیند فیلتراسیون	۱۹۹۷ (میلادی)
۲	*L. Besra & D.K. Sengupta*	بررسی تأثیر پارامترهای *pH* پالپ، درصد جامد و دانه‌بندی ذرات بر عملیات فیلتراسیون	۲۰۰۲ (میلادی)
۳	*I. Townsend*	بررسی پارامترهای دستگاهی فیلترپرس بر عملیات فیلتراسیون	۲۰۰۳ (میلادی)
۴	علی ملایجردی و همکاران	بررسی تأثیر نوع بافت پارچه فیلتر پلی استر بر کارایی مدار فیلتراسیون مجتمع چادرملو	۱۳۸۷ (شمسی)
۵	رضا کازرانی نژاد و همکاران	انتخاب پارچه فیلتر مناسب مدار فیلتراسیون کارخانه زغالشویی زرند	۱۳۸۷ (شمسی)
۶	سروش عرب زاده جرکانی و همکاران	بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت کیک فیلتر	۱۳۹۱ (شمسی)
۷	*Haijian Luo & Xun-an Ning*	بررسی تأثیر کمک فیلترها بر فرآیند فیلتراسیون	۲۰۱۳ (میلادی)
۸	سمیه دریکوند، علی اکبر عبداله زاده	بررسی تأثیر *pH* پالپ بر رطوبت کیک	۱۳۹۳ (شمسی)

۲- مواد و روش کار

با توجه ماهیت باطله‌های مورد مطالعه و مطابق تحقیقات صورت گرفته در زمینه فیلتراسیون، ۱۰ عامل به‌عنوان عوامل تأثیرگذار انتخاب شدند که شامل: درصد جامد پالپ، *pH* پالپ، افزودن کمک فیلتر شیمیایی، افزودن فلوکولانت، ضخامت صفحه فیلتر، زمان و فشار مرحله فشرده‌سازی، زمان و فشار مرحله دمیدن هوا و نوع پارچه فیلتر می‌باشند. پس از انجام مرحله نمونه‌برداری و تهیه نمونه معرف برای هر یک از کارخانه‌ها، مراحل ذیل انجام شد:

۲-۱- انجام مطالعات خواص‌سنجی

این مطالعات که شامل مطالعات آنالیز سرندی، *XRD* و تعیین ضریب تراکم‌پذیری است برای شناخت بیشتر نمونه‌های بررسی شد.

برای مشخص شدن اهمیت تعیین ضریب تراکم‌پذیری نمونه‌ها در فرآیند فیلتراسیون، در ادامه به ارائه توضیحاتی راجع به آن پرداخته شده است.

مقاومت مخصوص کیک فیلتر (α)، قابلیت مقاومت کیک در برابر جریان فیلتریت یا جریان آب شستشو در داخل کیک در یک فشار خاص است که از رابطه ۱ به‌دست می‌آید [۱۰].

$$\alpha=\alpha_0\Delta P^n \qquad (۱)$$

که در آن ΔP اختلاف فشار(Pa)، α_0 مقاومت مخصوص کیک در فشار واحد (m/Kg)، n شاخص یا ضریب تراکم‌پذیری و α مقاومت مخصوص کیک فیلتر(m/Kg) است.

با توجه به رابطه ۲، بالا بودن ضریب تراکم‌پذیری کیک فیلتر، افزایش مقاومت کیک در برابر عبور جریان فیلتریت را سبب می‌شود که طبق رابطه ۲ که از قانون دارسی و پوازوی[۷] نتیجه شده است، این موضوع کاهش نرخ فیلتراسیون را موجب می‌شود [۱۱].

$$\frac{t}{V}=\frac{\mu\alpha C}{2A^2\Delta P}V+\frac{\mu R_m}{A\Delta P} \qquad (۲)$$

که در آن t زمان بر حسب ثانیه، V حجم فیلتریت بر حسب متر مکعب، A مساحت فیلتراسیون بر حسب متر مربع، μ ویسکوزیته فیلتریت بر حسب کیلوگرم بر متر بر ثانیه، c درصد جامد پالپ و R_m مقاومت پارچه (m^{-1}) است.

با توجه به این‌که ضریب تراکم‌پذیری با نرخ فیلتراسیون و رطوبت نهایی کیک فیلتر همبستگی دارد و چون در پروژه حاضر بحث ترکیب نمونه‌های مختلف با درصدهای متفاوت مطرح بوده است؛ وجود یک مدل ساده که بتواند میزان این ضریب را برای نمونه‌های ترکیبی تعیین کند بسیار ارزشمند خواهد بود [۱۲]. چنین مدلی پیش‌تر معرفی نشده است. از

این رو آزمایش‌های تعیین ضریب تراکم‌پذیری برای نمونه‌هایی با نسبت‌های ترکیبی مختلف انجام شد.

۲-۲- انجام آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش

پس از انجام آزمایش‌های اولیه برای آشنایی با نحوه کار دستگاه، برای تعیین سطوح مناسب و همچنین اطمینان از تأثیرگذاری برخی عوامل انتخاب شده که سطوح و میزان تأثیرگذاری آن‌ها ناشناخته بودند آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش برای آن‌ها اجرا شد. این عوامل شامل pH پالپ، غلظت و نوع فلوکولانت، غلظت کمک فیلتر شیمیایی و نوع پارچه فیلتر بودند که بررسی شدند. عوامل ذکر شده یا به دلیل نوع ماده مورد استفاده قبلاً بررسی نشده‌اند و یا با استفاده از فیلترهای خلأ مطالعه شده‌اند و نحوه تأثیرگذاری آن‌ها بر نتایج فیلترپرس نامشخص بوده است.

شرایط ثابت اجرای این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در این آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر pH پالپ، در چهار pH، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ آزمایش‌هایی انجام شد. در اجرای این آزمایش‌ها از سود سوزآور ($NaOH$) و اسید سولفوریک (H_2SO_4) برای تنظیم pH استفاده شد. برای بررسی تأثیر فلوکولانت، فلوکولانت آنیونی $A26$ و فلوکولانت کاتیونی $K320$، هر یک در غلظت‌های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم بر تن استفاده شد و آزمایش‌هایی در این سطوح انجام شد. برای بررسی نقش کمک فیلتر شیمیایی نیز از کمک فیلتر پلی استیلن اکساید استفاده شد و در غلظت‌های ۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ گرم بر تن از این ماده آزمایش‌هایی انجام شد. در نهایت برای بررسی تأثیر نوع پارچه فیلتر نیز ۴ نوع مختلف از پارچه فیلتر تهیه شده و پس از مطالعات بافت‌شناسی و جنس‌شناسی این پارچه‌ها، آزمایش‌های فیلتراسیون برای انتخاب بهترین پارچه روی آن‌ها انجام شد.

لازم به توضیح است که در تمامی این آزمایش‌ها برای محاسبه میزان رطوبت و توان عملیاتی از روابط ذیل استفاده شد.

$$h = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{wet}} \times 100 \qquad (۳)$$

$$W = \frac{m_{dry} \times 60 \times 10^{-3}}{t \times A} \qquad (۴)$$

که در آن h رطوبت کیک فیلتر برحسب درصد، m_{wet} وزن کیک مرطوب برحسب کیلوگرم، m_{dry} وزن کیک خشک بر حسب کیلوگرم، W توان عملیاتی فیلتراسیون برحسب تن بر ساعت بر متر مربع، t زمان سیکل فیلتراسیون برحسب دقیقه و A سطح فیلتر برحسب متر مربع است [۱۳, ۱۴].

جدول ۲: شرایط ثابت آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش

شرایط آزمایش	واحد	میزان سطوح انتخابی
درصد جامد	درصد	۵۰
فشار مرحله فشرده‌سازی	بار	۸
زمان مرحله فشرده‌سازی	دقیقه	۲
فشار مرحله خشک کردن	بار	۴
زمان مرحله خشک کردن	دقیقه	۲
ضخامت صفحه فیلتر	میلی‌متر	۴۰
سطح مقطع فیلتر	متر مربع	۰/۰۲

۲-۳- انجام آزمایش‌های طراحی شده

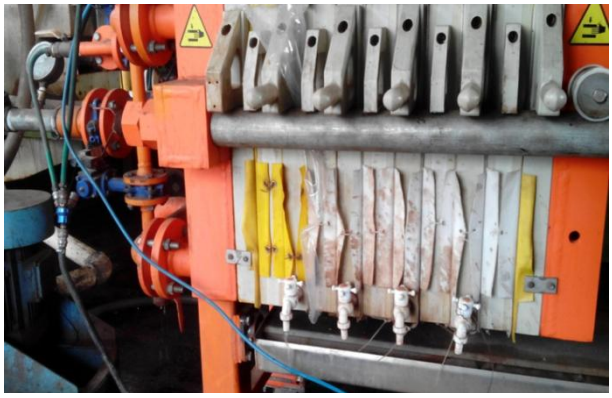
پس از انجام آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش و تعیین سطوح مناسب تعدادی از فاکتورها و حذف برخی فاکتورهای غیر مؤثر، آزمایش‌های طراحی شده‌ای برای تعیین اثرگذاری و بهینه‌سازی عوامل باقی‌مانده انجام شد. از مزیت‌های آزمایش‌های طراحی‌شده می‌توان به تعیین اثرات متقابل، امکان بهینه‌سازی عوامل مؤثر و ارائه مدل تجربی برای نتایج اشاره کرد.

طراحی آزمایش‌های اصلی با استفاده از نرم‌افزار $DX7$ و با روش فاکتوریال نامنظم صورت گرفت که بر اساس آن تعداد ۵۳ آزمایش که ۵ آزمایش آن تکرار در سطوح مرکزی بودند طراحی شد. روش فاکتوریل کسری نامنظم یک روش دو سطحی است که قادر به ارائه مدلی خطی برای پدیده است و با در نظر گرفتن آزمایش‌هایی در نقاط مرکزی سطوح، کفایت مدل برازش شده را نیز بررسی می‌کند. وضوح[۸] طرح به کار رفته، ۵ است بنابراین در این روش اثرات اصلی با یکدیگر و با اثرات متقابل دوگانه هم‌پوشانی[۹] ندارند. همچنین اثرات دوگانه نیز با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند. این طرح برای آزمایش‌هایی با تعداد فاکتورهای زیاد که به نوعی حالت غربال‌گری دارند، بسیار مناسب است. با توجه به اینکه تعداد متغیرهای در نظر گرفته شده (هشت متغیر) زیاد است و کوچک‌ترین طرح فاکتوریل کسری با وضوح ۵ و بدون تکرار نیاز به ۶۴ آزمایش دارد، استفاده از این طرح با ۵۳ آزمایش که ۵ آزمایش آن در سطوح مرکزی است، مناسب است.

۲-۴ بهینه‌سازی نتایج و انجام آزمایش‌های تکمیلی در شرایط بهینه

پس از انجام آزمایش‌های طراحی شده، بهینه‌سازی نتایج با سه هدف کمینه شدن رطوبت، بیشینه شدن توان عملیاتی و بهینه شدن هر دو پاسخ توسط نرم‌افزار $DX7$ انجام شده و

آزمایش‌های تکمیلی در شرایط بهینه، در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی[10] انجام شد. دستگاه نیمه‌صنعتی مورد استفاده برای اجرای آزمایش‌ها شامل ۱۰ صفحه فیلتر در ابعاد ۶۰ * ۶۰ سانتی‌متر مربع است (مطابق شکل ۲). در هنگام اجرای آزمایش نیمه‌صنعتی محدودیت‌های موجود (مانند متفاوت بودن نوع پارچه فیلتر دستگاه آزمایشگاهی با دستگاه نیمه‌صنعتی، متفاوت بودن ضخامت صفحه فیلتر و محدودیت در فشار اعمالی) مانع از اعمال بهینه تمامی عوامل مؤثر شد.



شکل ۲: تصویر دستگاه فیلترپرس نیمه‌صنعتی

۲-۵ محاسبه سطح فیلتر

برای تعیین مساحت مورد نیاز پروژه از رابطه ۵ استفاده شد [۶].

$$A_T = \frac{F_S}{W} \qquad (۵)$$

که در آن A_T مساحت فیلتراسیون مورد نیاز، F_S تناژ جامد ورودی بر واحد زمان و W توان عملیاتی فیلتراسیون است.

تناژ جامد باطله تولیدی تر کارخانه‌های تغلیظ مگنتیت و بازیابی هماتیت، ۳۰۰ تن بر ساعت است که در محاسبات سطح فیلتر با پیش‌بینی تغییرات احتمالی و بالا بردن ضریب اطمینان، این مقدار۳۴۰ تن بر ساعت در نظر گرفته شده است.

۳- ارائه یافته‌ها و نتایج

پس از انجام مراحل عملیاتی پروژه نتایج به شرح ذیل به‌دست آمد.

۳-۱ - نتایج مطالعات خواص سنجی

انجام آنالیز سرندی روی نمونه باطله کارخانه تغلیظ مگنتیت، نمونه باطله کارخانه بازیابی هماتیت و نمونه ترکیبی باطله‌های این دو کارخانه که طبق طرح شامل ۶۰ درصد از نمونه کارخانه تغلیظ مگنتیت و ۴۰ درصد از نمونه کارخانه بازیابی هماتیت است؛ نشان داد که D_{80} نمونه باطله کارخانه تغلیظ مگنتیت زیر ۳۸ میکرون است، بنابراین برای تعیین میزان دقیق آن، مطالعات لیزری برای ذرات کوچکتر از ۳۸ میکرون این نمونه نیز انجام شد. نتایج نهایی آنالیز ابعادی نمونه‌ها، مطابق جدول ۳ به‌دست آمد.

جدول ۳: نتایج مطالعات دانه‌بندی برروی نمونه‌های مختلف

ردیف	نمونه	D_{80} (μm)
۱	باطله کارخانه تغلیظ مگنتیت	۲۸
۲	باطله کارخانه بازیابی هماتیت	۱۳۲
۳	نمونه ترکیبی	۵۰

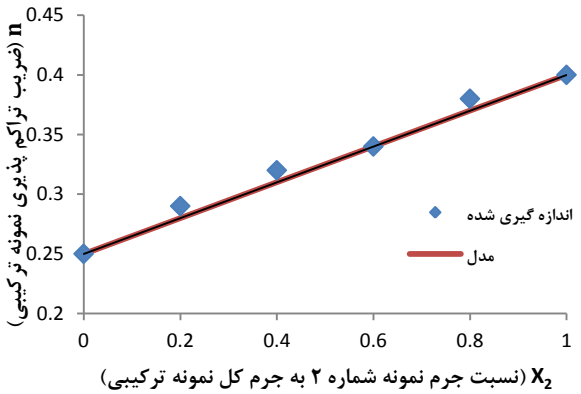
مطالعه *XRD* انجام شده روی نمونه‌ها نیز حاکی از وجود کانی‌های رسی در داخل آن‌ها بود. اصلی‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده نمونه‌ها شامل تالک، مگنتیت، هماتیت، پیریت، کلسیت و کوارتز و همچنین کانی‌هایی چون آنتیگوریت و کلینوکلر تشخیص داده شد.

با توجه به نتایج انجام آزمایش‌های تعیین ضریب تراکم‌پذیری، مدل رابطه ۶، برای ضریب تراکم‌پذیری نمونه‌های ترکیبی، معرفی شد.

$$n = X_2(n_2 - n_1) + n_1 \qquad (۶)$$

که در آن n_1 و n_2 ضرایب تراکم‌پذیری نمونه‌های ۱ و ۲ و n ضریب تراکم‌پذیری نمونه ترکیبی است. X_2 نیز نسبت جرم نمونه شماره ۲ به جرم کل نمونه ترکیبی است ($X_2 = 1 - X_1$). شکل ۳ نتایج تخمین ضریب تراکم‌پذیری با این مدل را با نتایج آزمایش‌ها مقایسه می‌کند و همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تخمین‌های مدل پیشنهادی بسیار به واقعیت نزدیک هستند. البته با توجه به ماهیت تجربی این مدل، باید توجه داشت که در صورتی که ماهیت نمونه‌های ۱ و ۲ تغییر کند، می‌بایست دوباره مدل را اعتبارسنجی کرد و این مدل برای ترکیب تمام نمونه‌های معدنی ممکن است معتبر نباشد.

نکته قابل توجه این است که ضریب تراکم پذیری برای نمونه باطله کارخانه هماتیت که دارای d_{80}=۱۳۲ میکرون است برابر ۰/۴ و این مقدار برای نمونه باطله کارخانه تغلیظ مگنتیت، با d_{80}=۲۸ میکرون، برابر ۰/۲۵ به‌دست آمده است، در صورتی که قاعدتا ذرات ریزتر می بایست ضریب تراکم پذیری بالاتری داشته باشند و سخت‌تر آبگیری شوند. این امر به میزان بیشتر کانی‌های رسی و نیز توزیع غیر یکنواخت دانه‌بندی نمونه باطله کارخانه هماتیت و پدیده تفکیک[11] نسبت داده شده است[۱۵].



شکل ۳: نمودار تعیین ضریب تراکم‌پذیری نمونه ترکیبی بر حسب نسبت نمونه باطله هماتیت به نمونه کل

۳-۲ نتایج آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش

نتایج آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش برای تعیین تأثیر pH پالپ نشان داد که نتایج فیلتراسیون برای pH های خنثی و قلیایی نسبت به pH اسیدی بهتر است که علت این پدیده به شرایط فیزیکی شیمیایی نمونه بر حسب نقطه بار صفر کانی‌ها نسبت داده شد [۱۴, ۱۵]. چون در این آزمایش-ها نتایج در pHهای خنثی و قلیایی تقریبا یکسان بود برای انجام بررسی‌های بیشتر، در سطوح ۷ و ۱۱ آزمایش‌های طراحی شده نیز به انجام رسید.

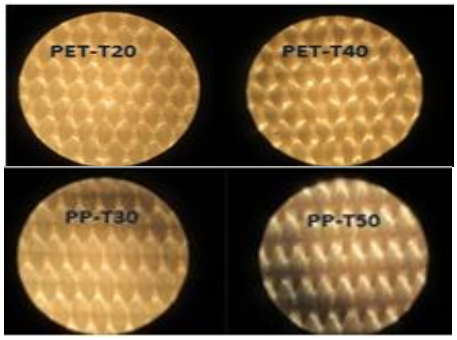
آزمایش‌های تعیین تأثیر کمک فیلتر نیز نشان داد که با اضافه کردن غلظت کمک فیلتر، "رطوبت کیک" فیلتر تغییر چندانی نمی‌یابد. این در حالی است که به نظر می‌رسید با افزایش غلظت کمک فیلتر از صفر تا ۳۰۰ گرم بر تن، "نرخ فیلتراسیون" روند افزایشی پیدا کرده است. احتمالاً توجیه این روند بدین گونه است که کمک فیلتر شیمیایی روی کشش سطحی آب تأثیر گذاشته و با کاهش آن نرخ آبگیری فیلتراسیون را افزایش داده است. افزایش نرخ در غلظت‌های مختلف سطح‌ساز مورد استفاده باعث افزایش سرعت آبگیری از کیک شده ولی قادر به کاهش رطوبت کیک یا به نوعی حذف آب‌های درگیر یا به دام افتاده که باعث ایجاد رطوبت در کیک می‌شود، نشده است. برای این عامل نیز با توجه به این‌که در این آزمایش‌ها، افزایش غلظت از ۳۰۰ تا ۵۰۰ گرم بر تن تأثیر مثبتی بر نتایج نداشت برای بررسی‌های بیشتر در آزمایش‌های طراحی شده، سطوح ذکر شده آزمایش شد.

آزمایش‌های تعیین تأثیر فلوکولانت نشان داد که این عامل تأثیر مثبتی بر رطوبت کیک فیلتر نداشته و حتی برخی از غلظت‌های آن باعث افزایش رطوبت شده است که علت آن احتمالاً گرفتگی روزنه‌های پارچه فیلتر، به واسطه زنجیره‌های هیدروکربنی فلوکولانت می‌باشد. این عامل بر روی نرخ فیلتراسیون نیز تأثیر مثبتی نداشته است که دلیل آن را می‌توان به شکسته شدن لخته‌ها در حین انتقال اسلاری و خوراک دهی با فشار بالا و عملاً بی‌تأثیر شدن آن برای این فرآیند دانست. این در حالی است که در فیلتراسیون خلأ به دلیل اعمال فشارهای پایین‌تر و در نتیجه عدم شکست لخته‌ها، فلوکولانت از عوامل بسیار تأثیرگذار است.

برای تعیین نوع جنس و بافت پارچه فیلترها، مطالعات جنس شناسی و تعیین بافت پارچه‌ها، پس از انجام مطالعات کتابخانه‌ای برای یافتن روش‌های آن [۱۳]، انجام شد.

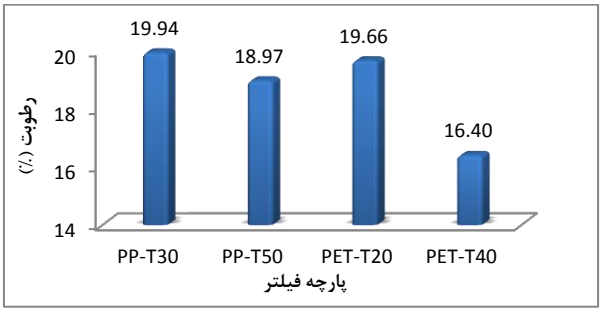
برای این آزمایش‌ها چهار پارچه فیلتر مختلف تهیه شده بود. مطالعات نشان داد که دو عدد از پارچه‌ها از جنس پلی استر و دو عدد دیگر از جنس پلی‌پروپیلن بودند.

برای تعیین نوع بافت پارچه‌ها نیز، از هر کدام از آن‌ها عکس میکروسکوپی گرفته شد که در شکل ۴ ارائه شده است. در این شکل کدهای PET برای پارچه‌های پلی استر و PP برای پارچه‌های پلی‌پروپیلن است.

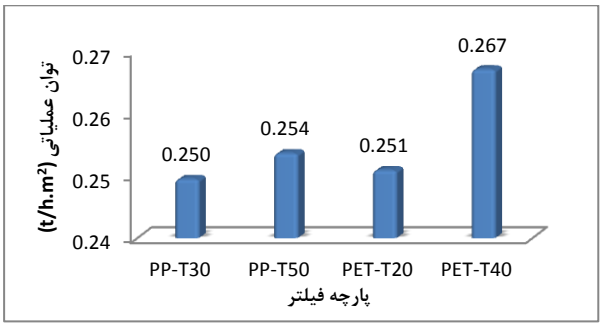


شکل ۴: تصویر میکروسکوپی پارچه فیلترها

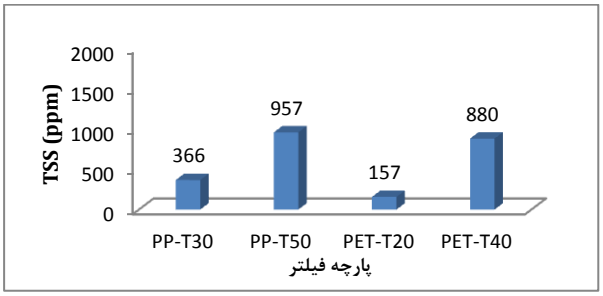
با توجه به شکل ۴ بافت تمامی پارچه‌ها بافت مربعی با الیاف چند رشته‌ای تشخیص داده شد. پس از تعیین جنس و نوع بافت پارچه فیلترها، آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش با شرایط آزمایشی جدول ۲، برای تعیین تأثیر پارچه فیلتر بر فیلترشوندگی باطله‌ها اجرا شد که نتایج مطابق شکل‌های ۵ تا ۷ به‌دست آمد.



شکل ۵: تأثیر پارچه فیلتر بر رطوبت نهایی فیلتر کیک



شکل ۶: تأثیر پارچه فیلتر بر توان عملیاتی فیلتراسیون



شکل ۷: تأثیر پارچه فیلتر بر مجموع ذرات جامد معلق در فیلتریت

با توجه به نتایج شکل‌های ۵ تا ۷ و با توجه به این نکته که پارچه‌ای که انتخاب می‌شود باید ترکیب بهینه‌ای از نرخ فیلتراسیون، رطوبت کیک و وضوح فیلتریت را داشته باشد پارچه فیلتر با کد *PET-T40* با داشتن توان عملیاتی و رطوبت نهایی کیک بهتر و همچنین وضوح فیلتریت نسبتاً مناسب، برای انجام تست‌های طراحی شده انتخاب شد.

پس از اتمام آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش، فاکتورهای مؤثر و سطوح بالا و پایین آن‌ها برای مرحله طراحی آزمایش، با توجه به تحقیقات پیشین و همچنین کاتالوگ شرکت‌های مختلف و با آگاهی از توان اجرایی دستگاه آزمایشی مورد استفاده و نتایج آزمایش‌های یک عامل در هر آزمایش مطابق جدول ۴ انتخاب شد.

جدول ۴: فاکتورهای آزمایش‌های طراحی شده و سطوح بالا و پایین آن‌ها

ردیف	نوع فاکتور	واحد	سطح پایین	سطح بالا
۱	درصد جامد	٪	۴۵	۶۵
۲	پالپ *pH*	_	۷	۱۱
۳	غلظت کمک فیلتر	گرم بر تن	۳۰۰	۵۰۰
۴	ضخامت کیک	میلی‌متر	۲۰	۴۰
۵	زمان مرحله فشرده‌سازی	دقیقه	۱	۳
۶	فشار مرحله فشرده‌سازی	بار	۷	۱۵
۷	زمان مرحله دمیدن هوا	دقیقه	۱	۵
۸	فشار مرحله دمیدن هوا	بار	۶	۱۲

۳-۳ نتایج آزمایش‌های طراحی شده

پس از انجام ۵۳ آزمایش طراحی‌شده و محاسبه میزان رطوبت و توان عملیاتی برای هر یک از این آزمایش‌ها، نتایج با استفاده از نرم‌افزار *DX7* بررسی شد که در ادامه به توضیح نتایج آن پرداخته شده است.

۳-۳-۱ بررسی عوامل مؤثر بر رطوبت نهایی کیک فیلتر

مدلی که نرم‌افزار برای محاسبه رطوبت کیک ارائه کرد مطابق رابطه (۷) است (مدل بر اساس کد ۱ و ۱- برای سطوح بالا و پایین متغیرها است).

$$Moisture = +18.32 + 0.22 * B - 0.63 * F - 0.50 * G + 0.25 * H + 0.22 * A * D - 0.23 * A * F + 0.24 * C * D + 0.19 * C * G + 0.33 * E * G \quad (۷)$$

در مدل پیشنهادی متغیر A معرف pH پالپ، B درصد جامد، C غلظت کمک فیلتر، D زمان مرحله فشرده‌سازی، E فشار مرحله فشرده‌سازی، F فشار مرحله دمیدن هوا، G زمان مرحله دمیدن هوا و H ضخامت کیک فیلتر است.

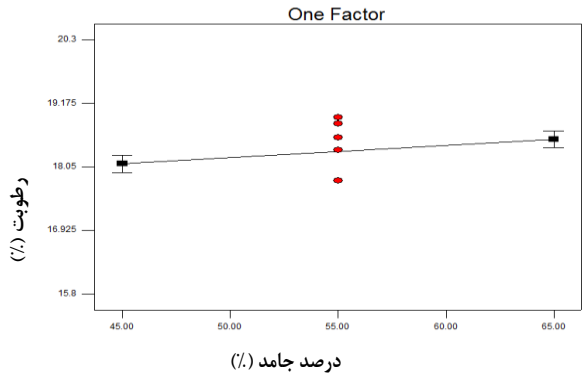
تحلیل واریانس این نتایج نیز حاکی از معنادار بودن مدل انتخابی، عدم وجود انحناء یا عدم نیاز به مدل غیر خطی برای نتایج و بی معنا بودن وجود خطای عدم برازش مدل است که در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: جدول تحلیل واریانس (*Anova*) نتایج مربوط به رطوبت نهایی کیک

ردیف		مقدار *P-Value*	
۱	مدل	کمتر از ۰/۰۰۰۱	معنادار
۲	*B*: درصدجامد	۰/۰۱۰۳	"
۳	*F*: فشار مرحله دمیدن هوا	کمتر از ۰/۰۰۰۱	"
۴	*G*: زمان مرحله دمیدن هوا	کمتر از ۰/۰۰۰۱	"
۵	*H*: ضخامت صفحه فیلتر	۰/۰۰۲۳	"
۶	*AD*	۰/۰۱۰۵	"
۷	*AF*	۰/۰۰۷۲	"
۸	*CD*	۰/۰۰۲۶	"
۹	*CG*	۰/۰۲۰۶	"
۱۰	*EG*	۰/۰۰۰۲	"
۱۱	عدم برازش مدل	۰/۳۹۸۹	بی معنا
۱۲	انحناء (نیاز به مدل درجه دو)	۰/۴۹۰۵	بی معنا

۳-۳-۱-الف) تأثیر درصد جامد بر رطوبت کیک

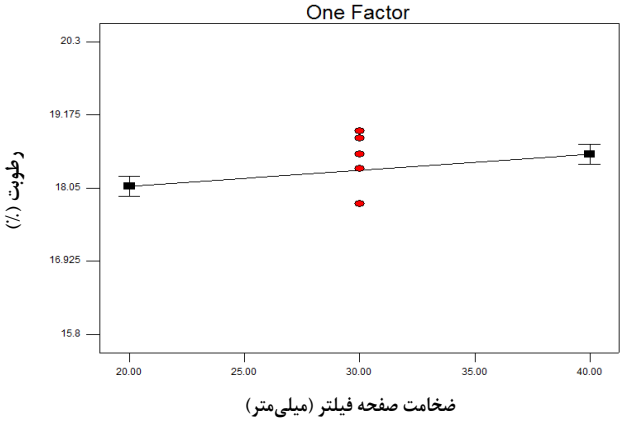
همان‌گونه که از شکل ۸ مشخص است افزایش درصد جامد پالپ باعث افزایش رطوبت نهایی کیک فیلتر شده است. دلیل این امر را می‌توان در تشکیل سریع کیک، گرفتگی منافذ پارچه فیلتر و همچنین افزایش مقاومت کیک دانست.



شکل ۸: تأثیر عامل درصد جامد پالپ بر رطوبت نهایی کیک فیلتر

۳-۳-۱-ب) تأثیر ضخامت صفحه فیلتر بر رطوبت کیک

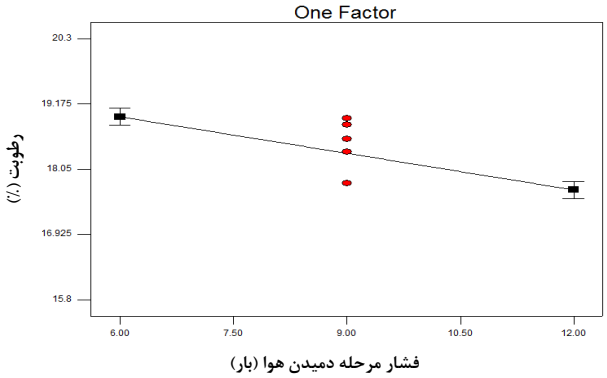
شکل (۹) که تأثیر ضخامت صفحه فیلتر بر روی رطوبت کیک فیلتر را نشان می‌دهد؛ نشانگر این مطلب است که با افزایش ضخامت صفحه فیلتر، رطوبت نهایی کیک فیلتر افزایش می‌یابد. علت این امر افزایش مقاومت کیک فیلتر با افزایش ضخامت کیک است که تأثیر منفی بر رطوبت کیک فیلتر گذاشته است.



شکل ۹: تأثیر عامل ضخامت کیک بر رطوبت نهایی کیک فیلتر

۳-۳-۱-ج) تأثیر فشار مرحله دمیدن هوا بر رطوبت کیک

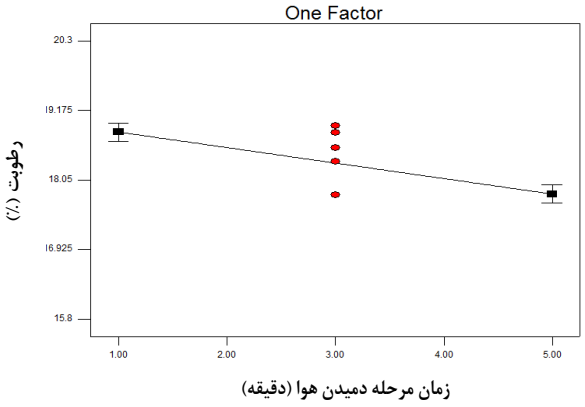
با مراجعه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش فشار مرحله دمیدن هوا، رطوبت کیک فیلتر به صورت خطی کاهش می‌یابد. دلیل آن این است که با افزایش فشار مرحله دمیدن هوا، هوایی که به داخل کیک فرستاده می‌شود، مقدار بیشتری از آب‌هایی که در داخل منافذ کیک به دام افتاده‌اند را به خارج از آن منتقل می‌کند که این امر کاهش رطوبت نهایی کیک را در بر دارد.



شکل ۱۰: تأثیر عامل فشار مرحله دمیدن هوا بر رطوبت نهایی کیک فیلتر

۳-۳-۱-د) تأثیر زمان مرحله دمیدن هوا بر رطوبت کیک

همان‌گونه که از شکل ۱۱ مشخص است افزایش زمان مرحله دمیدن هوا نیز کاهش رطوبت نهایی کیک را سبب شده است که دلیل آن افزایش میزان خروج آب‌های محبوس و به دام افتاده در داخل منافذ کیک با افزایش زمان اعمال فشار است:



شکل ۱۱: تأثیر عامل زمان مرحله دمیدن هوا بر رطوبت نهایی کیک فیلتر

۳-۳-۲- بررسی عوامل مؤثر بر توان عملیاتی فیلتراسیون

مدلی که نرم‌افزار برای محاسبه توان عملیاتی فیلتراسیون ارائه کرد مطابق رابطه (۸) است (مدل بر اساس کد ۱ و ۱- برای سطوح بالا و پایین است):

$$Throghput = 0.24 + 0.021 * B - 0.03 * D - 0.061 * G + 0.035 * H - 0.012 * B * G + 0.017 * D * G \quad (۸)$$

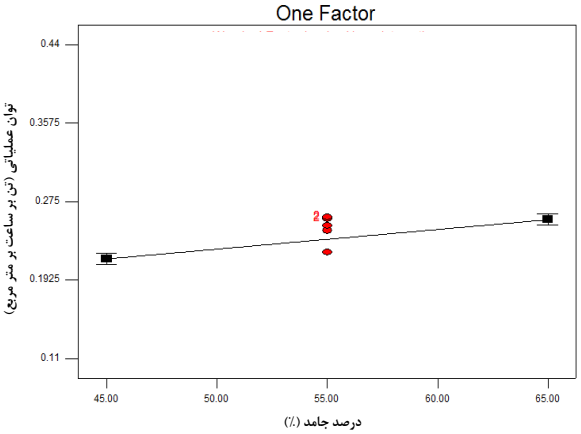
در این مدل پیشنهادی متغیر B معرف درصد جامد پالپ، D زمان مرحله فشرده‌سازی، G زمان مرحله دمیدن هوا و H معرف ضخامت کیک می‌باشد. تحلیل واریانس این نتایج نیز حاکی از معنادار بودن مدل انتخابی، عدم وجود انحناء یا عدم نیاز به مدل غیرخطی برای نتایج و بی معنا بودن وجود خطای عدم برازش مدل است که در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: جدول تحلیل واریانس (*Anova*) نتایج مربوط به توان عملیاتی فیلتراسیون

ردیف		مقدار *P-Value*	
۱	مدل	کمتر از ۰/۰۰۰۱	معنادار
۲	*B*: درصدجامد	کمتر از ۰/۰۰۰۱	"
۳	*D*: زمان مرحله فشرده‌سازی	کمتر از ۰/۰۰۰۱	"
۴	*G*: زمان مرحله دمیدن هوا	کمتر از ۰/۰۰۰۱	"
۵	*H*: ضخامت صفحه فیلتر	کمتر از ۰/۰۰۰۱	"
۶	*BG*	۰/۰۱۰۵	"
۷	*DG*	۰/۰۰۷۲	"
۸	عدم برازش مدل	۰/۲۴۸۲	بی معنا
۹	انحناء (نیاز به مدل درجه دو)	۰/۲۷۸۶	بی معنا

۳-۳-۲-الف) تأثیر درصد جامد بر توان عملیاتی فیلتراسیون

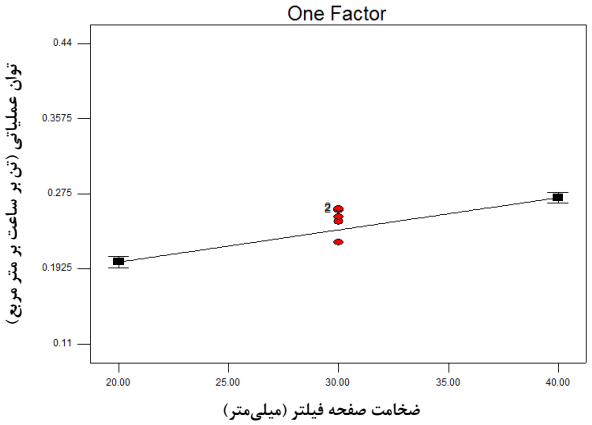
با توجه به شکل ۱۲ افزایش درصد جامد پالپ باعث افزایش توان عملیاتی فیلتراسیون شده است. دلیل این امر کاهش زمان مرحله خوراک دهی است. افزایش درصد جامد پالپ پر شدن سریع‌تر صفحات فیلتر را سبب می‌شود که این امر نیز باعث کاهش زمان مرحله خوراک دهی خواهد شد.



شکل ۱۲: تأثیر درصد جامد پالپ بر توان عملیاتی فیلتراسیون

۳-۳-۲-ب) تأثیر ضخامت صفحه فیلتر بر توان عملیاتی فیلتراسیون

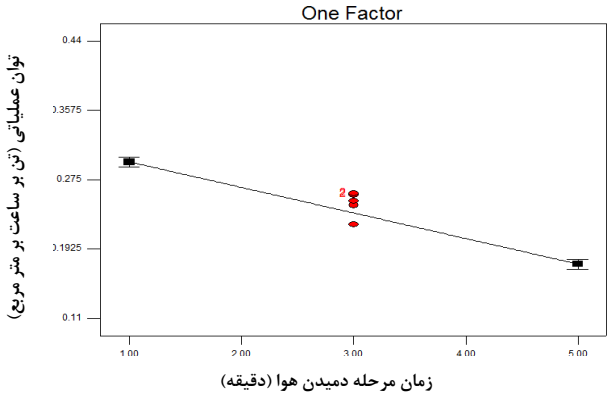
همان‌گونه که در شکل ۲۳ دیده می‌شود افزایش ضخامت کیک فیلتر باعث افزایش توان عملیاتی شده است که این افزایش را می‌توان با مراجعه به رابطه توان عملیاتی توجیه کرد. با توجه به رابطه ۴ مشخص است که توان عملیاتی با وزن کیک خشک رابطه مستقیم و با زمان سیکل رابطه معکوس دارد. زمان کل سیکل متشکل از زمان مرحله خوراک‌دهی، زمان مرحله فشرده‌سازی (چلاندن)، مرحله دمیدن هوا (یا خشک کردن) و زمان مراحل فنی از قبیل باز و بسته کردن صفحات فیلتر، تخلیه کیک و شستشوی پارچه فیلتر است. دلیلی که باعث می‌شود تا ضخامت‌های پایین صفحه فیلتر نسبت به ضخامت‌های بالاتر توان عملیاتی پایینی را منجر شوند این است که به جز زمان مرحله خوراک‌دهی که با کاهش ضخامت کیک کاهش می‌یابد باقی زمان‌ها شامل زمان مراحل فشرده‌سازی، دمیدن هوا و زمان‌های فنی برای همه ضخامت‌ها یکسان بوده که این امر سبب می‌شود تا برای ضخامت‌های پایین‌تر، نسبت وزن کیک خشک تولیدی به زمان کلی سیکل در مقابل ضخامت‌های بالاتر، کم‌تر شود که این کاهش، کاهش توان عملیاتی فیلتراسیون را نیز در بر خواهد داشت.



شکل ۱۳: تأثیر ضخامت صفحه فیلتر بر توان عملیاتی فیلتراسیون

۳-۳-۲-ج) تأثیر زمان مرحله دمیدن هوا بر توان عملیاتی فیلتراسیون

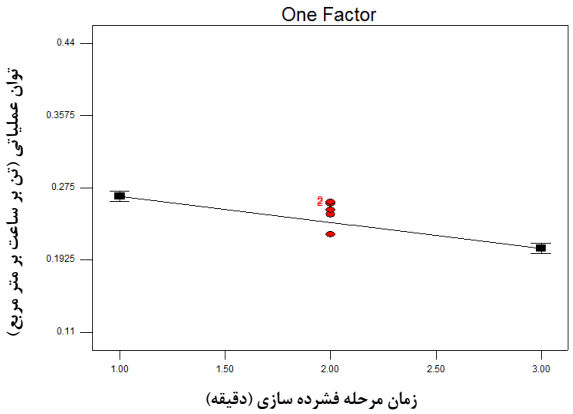
افزایش زمان مرحله دمیدن هوا کاهش توان عملیاتی فیلتراسیون را سبب می‌شود که علت این امر نیز افزایش زمان کلی سیکل می‌باشد. تأثیر این عامل را در شکل ۱۴ می‌توان دید.



شکل ۱۴: تأثیر زمان مرحله دمیدن هوا بر توان عملیاتی فیلتراسیون

۳-۳-۲-د) تأثیر زمان مرحله فشرده‌سازی بر توان عملیاتی فیلتراسیون

همان‌گونه که از شکل ۱۵ مشخص است، افزایش زمان مرحله فشرده‌سازی، کاهش توان عملیاتی فیلتراسیون را سبب شده است. این کاهش به دلیل افزایش زمان کلی سیکل است که با توجه به رابطه معکوس توان عملیاتی با زمان سیکل فیلتراسیون به‌طور کامل این نتیجه توجیه‌پذیر است.



شکل ۱۵: تأثیر زمان مرحله فشرده‌سازی بر توان عملیاتی فیلتراسیون

۳-۳-۳ بهینه‌سازی نتایج

بهینه‌سازی نتایج فیلتراسیون را در چند بخش که هر یک با هدف خاصی صورت می‌گیرد، می‌توان انجام داد.

۳-۳-۳-الف) کمینه شدن رطوبت نهایی کیک فیلتر

کاهش حداکثری میزان رطوبت در جهت تسهیل حمل و انباشت باطله‌ها و نیز بازیابی حداکثری آب بسیار با اهمیت است. بنابراین ابتدا بهینه کردن عوامل، با اولویت قرار دادن کمینه شدن رطوبت، تحت شرایط عملیاتی ذکر شده در جدول ۷ انجام شد.

جدول ۷: شرایط عملیاتی اجرای آزمایش بهینه رطوبت نهایی کیک فیلتر همراه با کاهش هزینه‌های اضافی

ردیف	نوع فاکتور	واحد	سطح پایین	سطح بالا	تغییرات اعمالی
۱	درصد جامد	٪	۴۵	۶۵	بدون تغییر
۲	pH پالپ	_	۷	۱۱	کمینه در نظر گرفته شد
۳	غلظت کمک فیلتر	گرم بر تن	۳۰۰	۵۰۰	کمینه در نظر گرفته شد
۴	ضخامت کیک	میلی‌متر	۲۰	۴۰	بدون تغییر
۵	زمان مرحله فشرده‌سازی	دقیقه	۱	۳	کمینه در نظر گرفته شد
۶	فشار مرحله فشرده‌سازی	بار	۷	۱۵	کمینه در نظر گرفته شد
۷	زمان مرحله دمیدن هوا	دقیقه	۱	۱۰	افزایش یافت
۸	فشار مرحله دمیدن هوا	بار	۶	۱۶	افزایش یافت

برای این شرایط که با هدف کاهش هزینه‌های اضافی و کم کردن هر چه بیشتر میزان رطوبت کیک فیلتر صورت گرفت، پس از اعمال تغییرات عنوان‌شده نتیجه پیش‌بینی نرم‌افزار برای رطوبت برابر ۱۴/۴۴ درصد حاصل شد که این نتایج با انجام سه آزمایش تکرار اعتبارسنجی شد که نتایج آن در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸: نتایج آزمایش‌های اعتبارسنجی رطوبت بهینه با سه تکرار

ردیف	زمان کل سیکل (دقیقه)	رطوبت نهایی کیک فیلتر (٪)	توان عملیاتی (تن بر ساعت بر مترمربع)
۱	۱۳/۶۶	۱۴/۳۲	۰/۰۹۹
۲	۱۳/۵۸	۱۴/۲۲	۰/۰۹۴
۳	۱۳/۳۵	۱۴/۵۳	۰/۰۹۳

میانگین رطوبت کیک در این سه آزمایش، ۱۴/۳۶ درصد و انحراف معیار آن ۰/۱۶ درصد است. در سطح اعتماد ۹۵٪، رطوبت کیک به‌دست آمده از این سه آزمایش باید در محدوده ۱۴/۳۶±۰/۳۲ یعنی بین ۱۴/۰۴ و ۱۴/۶۷ باشد. رطوبت تخمینی نرم‌افزار ۱۴/۴۴ درصد است که کاملاً در این محدوده قرار دارد. بنابراین نتایج این سه آزمایش حاکی از اعتبار مدل هستند و با اطمینان بالایی می‌توان از آن در پیش‌بینی حالات مختلف عملیاتی استفاده کرد.

۳-۳-۳-ب) بیشینه شدن توان عملیاتی فیلتراسیون

افزایش توان عملیاتی یا به نحوی افزایش نرخ جامد تولیدی در واحد سطح فیلتراسیون، باعث کاهش میزان سطح فیلتر مورد نیاز و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی مربوط به تولید می‌شود. از این رو بهینه‌سازی فاکتورها این‌بار با هدف بیشینه کردن توان عملیاتی انجام شد. برای این هدف، سطح بالای عامل ضخامت صفحه فیلتر که یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر توان عملیاتی فیلتراسیون است، از ۴۰ میلی‌متر به ۵۰ میلی‌متر افزایش یافت تا برای این نتایج برون‌یابی نیز صورت پذیرد. پس از در نظر گرفتن این شرایط، نتیجه پیش‌بینی نرم‌افزار برای توان عملیاتی فیلتراسیون ۰/۴۴ تن بر ساعت بر متر مربع بود. آزمایش‌های اعتبارسنجی این نتایج در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹: نتایج آزمایش‌های اعتبارسنجی توان عملیاتی بهینه دو بار تکرار

ردیف	زمان کل سیکل (دقیقه)	رطوبت نهایی کیک فیلتر (٪)	توان عملیاتی (تن بر ساعت بر مترمربع)
۱	۷/۰۱	۱۸/۲۹	۰/۴۶۳
۲	۷/۱۴	۱۸/۰۹	۰/۴۵۷

میانگین توان عملیاتی در این دو آزمایش، ۰/۴۶ تن بر ساعت بر متر مربع است که به مقدار ۰/۴۳ پیشنهادی نرم‌افزار بسیار نزدیک است. نکته قابل توجه این است که اگر چه رطوبت حدوداً ۴ درصد از رطوبت بهینه در بهینه‌سازی قبلی بیشتر شده و از ۱۴/۳۶درصد به میانگین ۱۸/۱۹ درصد رسیده است، توان عملیاتی حدود ۴۸۰ درصد (حدود ۵ برابر) افزایش داشته است.

۳-۳-۳-ج) بهینه شدن هر دو پاسخ

با توجه به نتایج بخش‌های قبل مشخص است که نقطه مطلوب جایی است که هم توان عملیاتی بیشینه شود و هم رطوبت کیک کمینه شود. البته در عمل، محدودیت‌های فنی و نیز مطالعات اقتصادی وزن هر یک از این دو هدف را تعیین خواهند کرد. به کمک مدل رگرسیون می‌توان بهینه‌سازی همزمان پارامترها، یعنی کاهش رطوبت و افزایش توان عملیاتی فیلتراسیون را نیز انجام داد. در این عملیات، اهمیت بهینه‌سازی رطوبت کیک ۵ و اهمیت بهینه‌سازی توان عملیاتی ۳ در نظر گرفته شده است. این اوزان را می‌توان بر حسب نیاز تغییر داد و نتایج جدیدی گرفت.

نتایج پیش‌بینی نرم‌افزار برای این حالت رطوبت ۱۶/۷۳ درصد و توان عملیاتی ۰/۲۲ تن بر ساعت بر متر مربعی بود که نتایج اعتبارسنجی این نتایج در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰: نتایج آزمایش‌های تکمیلی در شرایط بهینه هر دو پاسخ به همراه آزمایش تکرار

ردیف	زمان کل سیکل (دقیقه)	رطوبت نهایی کیک فیلتر (٪)	توان عملیاتی (تن بر ساعت بر مترمربع)
۱	۱۲/۶	۱۷/۱	۰/۱۹۸
۲	۱۳/۱۵	۱۶/۹۳	۰/۲۱۱

۳-۴ بزرگ مقیاس کردن نتایج در مقیاس پایلوت

پس از انجام آزمایش‌های تکمیلی در مقیاس آزمایشگاهی در شرایط بهینه مختلف، برای بزرگ مقیاس کردن این نتایج، آزمایشی در مقیاس پایلوت در شرایط بهینه هر دو پاسخ اجرا شد. برای این کار ابتدا با توجه به محدودیت‌های دستگاه فیلترپرس نیمه‌صنعتی، شرایط آزمایش تکمیلی نیمه‌صنعتی مطابق جدول ۱۱ تعیین شد.

مقایسه بین نتایج پیش‌بینی شده نرم‌افزار با مقادیر به‌دست آمده از آزمایش‌ها در جدول ۱۲آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است، نتایج پیشنهادی نرم‌افزار با نتایج به‌دست آمده چندان مطابق نیست که از دلایل آن می‌توان به متفاوت بودن پارچه فیلتر مورد استفاده برای این آزمایش با پارچه فیلتر دستگاه آزمایشگاهی و متفاوت بودن توان پمپ خوراک‌دهی استفاده شده برای دو تجهیز اشاره کرد. با این حال نتایج نشان داد که برای این شرایط نیز رسیدن به رطوبت زیر ۲۰ درصد مقدور بوده است.

جدول ۱۱: شرایط عملیاتی اجرای آزمایش تکمیلی در حالت بهینه هر دو پاسخ برای مقیاس پایلوت

ردیف	نوع فاکتور	واحد	سطح پایین	سطح بالا	تغییرات اعمالی
۱	درصد جامد	٪	۴۵	۵۵	کاهش یافت
۲	pH پالپ	_	۷	۱۱	کمینه در نظر گرفته شد
۳	غلظت کمک فیلتر	گرم بر تن	۳۰۰	۵۰۰	کمینه در نظر گرفته شد
۴	ضخامت کیک	میلی‌متر	۱۰	۲۰	کاهش یافت
۵	زمان مرحله فشرده‌سازی	دقیقه	۱	۳	کمینه در نظر گرفته شد
۶	فشار مرحله فشرده‌سازی	بار	۵	۶	کاهش یافت
۷	زمان مرحله دمیدن هوا	دقیقه	۱	۱۰	افزایش یافت
۸	فشار مرحله دمیدن هوا	بار	۵	۶	کاهش یافت

جدول ۱۲: نتایج آزمایش‌های تکمیلی رطوبت و توان عملیاتی بهینه در مقیاس نیمه‌صنعتی

ردیف	عنوان	زمان کل سیکل (دقیقه)	رطوبت نهایی کیک فیلتر (٪)	توان عملیاتی (تن بر ساعت بر مترمربع)
۱	پیش بینی شده	ـــ	۱۸/۰۷۵	۰/۱۷
۲	نتایج آزمایش	۱۰/۱	۱۹/۳۴	۰/۱۲

۴- نتیجه‌گیری

- نتایج مطالعات خواص‌سنجی (شامل مطالعات آنالیز سرندی، XRD و تعیین ضریب تراکم‌پذیری) روی نمونه‌های مورد بررسی، حاکی از توجیه‌پذیر بودن استفاده از دستگاه فیلترپرس، برای فیلتراسیون این نمونه‌ها بود. بر اساس مطالعات انجام شده ضریب تراکم‌پذیری نمونه ترکیبی، رابطه خطی با ضریب تراکم‌پذیری هر یک از

نمونه‌ها داشت. ضریب تراکم‌پذیری نمونه مورد مطالعه ۰/۳۲ به‌دست آمد.

نتایج مطالعات یک عامل در هر آزمایش نشان داد که دو عامل pH پالپ و غلظت کمک فیلتر تأثیر مثبتی بر نتایج فیلتراسیون دارند اما غلظت فلوکولانت تأثیر منفی دارد.

- همچنین بر اساس نتایج این آزمایش‌ها پارچه فیلتر-*PET T40* به‌عنوان پارچه مناسب انتخاب شد.
- نتایج آزمایش‌های طراحی شده در سطوح مورد آزمایش، تأثیر عواملی چون درصد جامد، ضخامت صفحه فیلتر، فشار و زمان مرحله دمیدن هوا را روی رطوبت کیک بارز دانست. به‌طوری که افزایش درصد جامد و ضخامت صفحه فیلتر منجر به افزایش رطوبت و افزایش فشار و زمان مرحله دمیدن هوا کاهش رطوبت نهایی کیک فیلتر را سبب می‌شد. علاوه بر این نتایج این آزمایش‌ها تأثیر عواملی چون درصد جامد، ضخامت کیک، زمان مرحله فشرده‌سازی و زمان مرحله دمیدن هوا را بر روی توان عملیاتی فیلتراسیون بارز دانست. برای این پاسخ نیز افزایش درصد جامد و ضخامت صفحه فیلتر باعث افزایش توان عملیاتی و افزایش زمان مرحله فشرده‌سازی و مرحله دمیدن هوا باعث کاهش توان عملیاتی می‌شود.
- بهینه‌سازی نتایج با سه هدف کمینه کردن رطوبت، بیشینه کردن توان عملیاتی و ترکیب این دو هدف انجام شد که نتایج اعتبارسنجی آن به شرح ذیل بود:

۱- به‌دست آمدن رطوبت ۱۴/۳۶ درصدی برای حالتی که تنها کمینه شدن رطوبت (جهت حمل و انباشت آسان باطله‌ها) مد نظر باشد. برای رسیدن به این مقدار از رطوبت، توان عملیاتی پایین ۰/۰۷ تن بر ساعت بر متر مربع حاصل خواهد شد.

۲- به‌دست آمدن توان عملیاتی ۰/۲۷ تن بر ساعت بر متر مربعی برای حالتی است که توان عملیاتی بالا به‌دلیل محدودیت‌های سرمایه‌ای مد نظر باشد. برای این کار رطوبت میانگین نسبتاً بالای ۱۸/۱۹ حاصل شد.

۳- حاصل شدن رطوبت ۱۷ درصد و توان عملیاتی ۰/۱۴۷ تن بر ساعت بر متر مربعی برای شرایط بهینه هر دو پاسخ.

- بزرگ مقیاس کردن نتایج برای شرایط بهینه هر دو پاسخ در مقیاس پایلوت نیز انجام شد که نتایج کمی با نتایج آزمایشگاهی اختلاف داشت که این امر به دلیل تفاوت در نوع پارچه فیلتر نصب شده بر روی دو دستگاه و پمپ خوراک‌دهی هر یک از آن‌ها، قابل پیش بینی بود.

۵- تقدیر و تشکر

از مدیریت و پرسنل محترم پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل‌گهر سیرجان و پروژه بازیابی آب این شرکت و نیز دانشگاه تربیت مدرس، به دلیل پشتیبانی مالی و تجهیزاتی این تحقیق قدردانی می‌شود.

مراجع

[1].Cheremisinoff, N.P. *2001, "Handbook of water and wastewater treatment technologies"*. Butterworth-Heinemann.

[2]. Luo, H., et al., 2013, "*Effects of sawdust-CPAM on textile dyeing sludge dewaterability and filter cake properties*". Bioresource technology,. 139: p. 330-336.

[3]. Besra, L. D. Sengupta, and S. Roy, 2000 "*Particle characteristics and their influence on dewatering of kaolin, calcite and quartz suspensions. International journal of mineral processing*". 59(2): p. 89-112.

[4]. Besra, L., et al. 1998, "*Influence of surfactants on filter cake parameters during vacuum filtration of flocculated iron ore sludg*e". Powder technology,. 96(3): p. 240-247.

[5]. Townsend, I. 2003, *"Automatic pressure filtration in mining and metallurgy"*. Minerals engineering,. 16(2): p. 165-173.

[۶]. عرب‌زاده جرکانی, سروش. ۱۳۹۱. "امکان‌سنجی فیلتراسیون باطله‌های تر کارخانه‌های فرآوری شرکت صنعتی و معدنی گل‌گهر." مرکز تحقیقات سنگ آهن و فولاد گل‌گهر.

[۷]. کازرانی نژاد, رضا و همکاران. ۱۳۸۷. "انتخاب پارچه فیلتر مناسب مدار فیلتراسیون کارخانه زغالشویی زرند." دومین کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه تهران.

[۸]. دریکوند, سمیه. عبداله زاده, علی‌اکبر. ۱۳۹۳. "بررسی تأثیر pH بر روی کاهش رطوبت کیک فیلتر کنسانتره دانه ریز روی باما." پنجمین کنفرانس مهندسی معدن. مصلی تهران.

[۹]. ملایجردی, علی. ۱۳۸۶. "بررسی راه‌های افزایش کارایی مدار فیلتراسیون مجتمع معدنی و صنعتی چادرملو." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[10]. Gupta, A. and D. Yan, 2006 "*Mineral processing design and operation: an introduction*." Elsevier.

[11]. Jämsä-Jounela, S.-L., et al., 2005 *"Operator support system for pressure filters."* Control engineering practice *"*. 13(10): p. 1327-1337.

[۱۲]. اسمعیلی, نادر و همکاران. ۱۳۹۳. "بررسی ضریب تراکم‌پذیری باطله کارخانه‌های فرآوری مجتمع گل‌گهر با هدف طراحی سیستم فیلتراسیون." پنجمین کنفرانس مهندسی معدن ایران- تهران.

[13]. Sparks, T. 2011. *"Solid-Liquid Filtration: A user's guide to minimizing cost & environmental impact, maximizing quality & productivity*." Elsevier.

[۱۴]. اسمعیلی, نادر و همکاران. ۱۳۹۳. "بررسی تأثیر pH پالپ بر فیلترشوندگی باطله کارخانه‌های فرآوری مجتمع گل‌گهر با استفاده از فیلترپرس." کنفراس علوم معدنی مازنداران-ساری.

[۱۵]. اسمعیلی, نادر. "تعیین پارامترهای مؤثر بر فیلترشوندگی باطله کارخانه های فرآوری گل‌گهر." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس, ۱۳۹۳.

پی‌نوش

[1] *High Rate Thickener (HRT)*
[2] *Labox*
[3] *Feeding*
[4] *Pressing or Squeezing*
[5] *Air blowing or Drying*
[6] *Townsend*
[7] *Poiseuille*
[8] *Resolution*
[9] *Alias*
[10] *Pilot plant*
[11] *Segragation*