افزایش عملکرد خشک‌کن مجتمع مس سرچشمه

غلامعباس پارساپور[1*]، احسان ارغوانی[2]، سعید درویش تفویضی[2]، غلامرضا لنگری‌زاده[3]، صمد بنیسی[4]

۱- استادیار فرآوری مواد، دانشگاه ولی عصر(عج) رفسنجان

۲- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر

۳- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، مجتمع مس سرچشمه

۴- استاد فرآوری مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

پیام‌نگار: G.Parsapour@vru.ac.ir

چکیده

آبگیری از کنسانتره مس در کارخانه‌های تغلیظ مجتمع مس سرچشمه، به ترتیب، در واحدهای تیکنر، فیلتر و خشک‌کن انجام می‌شود. یکی از مهمترین مشکلات خشک‌کن‌های این مجتمع افزایش نامعمول دما در انتهای کانال انتقال هوای گرم به دلیل مسدود شدن آن با مواد مرطوب ورودی، و در نتیجه توقف زود هنگام خشک‌کن است. بررسی‌های انجام شده نشان داد که دلیل مسدود شدن کانال انتقال هوای گرم، پاشش مواد مرطوب به درون کانال، به دلیل برخورد با بدنه خشک‌کن و مواد زیرین است. از این‌رو به منظور جلوگیری از انسداد کانال انتقال هوای گرم، زاویه صفحات بالابر اولیه از ۹۰ به ۷۵ درجه کاهش، زاویه زانویی ضربه‌زن‌های بدنه از ۱۳۵ به ۱۵۵ درجه افزایش و سقف کانال انتقال هوای گرم به طول ۷۰ سانتیمتر به درون بخش گردان خشک‌کن امتداد داده شد. تغییرات انجام شده باعث افزایش دوره کارکرد خشک‌کن از میانگین ۷ به ۱۸ روز شد.

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۱۸

شماره صفحات: ۲۲ تا ۳۳

کلیدواژه‌ها: خشک‌کن، کنسانتره، محفظه احتراق، انسداد کانال.

۱. مقدمه

خشک کردن از دیدگاه نظری عبارت است از انتقال همزمان جرم و گرما در محیط متخلخل. نخستین تحلیل مهندسی از خشک کردن را لوئیس در سال ۱۹۲۹ با فرض این که خشک کردن در دو مرحله پخش رطوبت به سطح از داخل جامد و بخار شدن رطوبت از سطح جامد، ارایه داد[۱]. امروزه از انواع خشک‌کن‌ها در صنایع گوناگون استفاده‌های زیادی می‌شود. در میان کلیه عملیات واحدهای صنعتی در مهندسی شیمی، شاید عملیات مربوط به خشک کردن مواد، از بیشترین کاربرد برخوردار است. از این‌رو فرایند خشک‌کردن و طراحی دستگاه‌های مربوطه در مقیاس صنعتی از اهمیت خاصی برخوردار است.

سینیتیک خشک کردن از بررسی سه پارامتر دمای هوای خشک‌کننده، سرعت جریان هوای خشک کننده و اندازه ذرات به دست می‌آید. معمولاً قبل از خشک کردن صنعتی یک مرحله عمل رطوبت‌زدایی مکانیکی، مانند فیلتر خلأ، فیلتر فشاری و یا سانتریفوژ

* رفسنجان، دانشگاه ولی عصر(عج)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن

انجام می‌شود؛ زیرا جداسازی رطوبت از طریق عملیات مکانیکی آسان‌تر و ارزان‌تر از کاربرد روش‌های حرارتی است.

۱-۱ سازوکارهای عملکرد خشک کن‌ها

در خشک‌کن‌های صنعتی بخش کمی از حرارت از طریق تابش انتقال می‌یابد و بیشتر گرما به روش جابه‌جایی و یا هدایت منتقل می‌شود. در صورت انتقال مستقیم گرما از فاز گاز به فاز جامد، خشک‌کن را نوع حرارت مستقیم، و در صورتی که گرما به صورت نامستقیم و از طریق دیواره یا لوله فلزی به مواد جامد منتقل شود، خشک‌کن را نوع گرمای نامستقیم می‌گویند.

در بسیاری از خشک‌کن‌ها، حرکت مواد مرطوب و هوای گرم در یک جهت است که در این صورت خشک‌کن هم جهت[1] نامیده می‌شود[۲]. در برخی خشک‌کن‌ها حرکت مواد مرطوب و هوای داغ در خلاف جهت هم هست که در این صورت خشک‌کن ناهمسو و یا خلاف جهت[2] نام دارد[۲]. در جریان‌های ناهمسو، داغ‌ترین گاز در تماس با خشک‌ترین مواد جامد قرار می‌گیرد، به طوری که دمای جامد تا حد امکان به دمای گاز ورودی نزدیک است. این روش به سریع‌ترین حالت خشک شدن می‌انجامد و البته در مواردی هم به آسیب رسیدن به محصول منجر خواهد شد. در جریان‌های همسو، مرطوب ترین مواد جامد با داغ‌ترین گاز در تماس است و در نتیجه در این حالت حتی مواد حساس به دما نیز می توانند بدون ایجاد اشکال خشک شوند. در جریان‌های همسو کنترل بیشتری بر میزان رطوبت محصول صورت می‌گیرد[۳].

خشک‌کن‌ها به دو نوع کلی ثابت و یا دوار تقسیم می‌شوند. خشک‌کن دوار شامل یک پوسته استوانه‌ای گردان است که معمولاً زاویه کوچکی نسبت به افق به سمت بخش خروجی دارد. خوراک مرطوب از سر استوانه وارد و از انتهای دیگر آن، محصول خشک شده خارج می‌شود. در این خشک‌کن‌ها چرخش استوانه باعث می‌شود صفحات بالابر، مواد جامد را در معرض جریان هوای داغ قرار گیرند و درنتیجه سطح مواد جامد به طور کامل با هوای داغ برخورد پیدا می‌کند و عمل خشک شدن کارآمدتر انجام می‌شود[۳]. در خشک‌کن‌های دوار سرعت چرخش خشک‌کن، شکل و تعداد بالابرهای درون آن و سرعت جریان هوا، زمان ماند مواد را تعیین می‌کند[۳]. خشک‌کن‌های دوار با جریان همسو بهترین انتخاب برای کنسانتره مس به‌شمار می‌آید[۴]. از این نوع خشک‌کن در کشورهای آلمان، ژاپن و دیگر کشورها برای کنسانتره مس و نیز برای خشک کردن کربن، فسفات، سرب و روی نیز در کشورهای سوئد، آمریکا و استرالیا استفاده شده است[۵]. علاوه بر این، خشک‌کن‌های دوار معمولاً در صنایع غذایی و فرآوری مواد به دلیل سادگی، هزینه پایین و انعطاف‌پذیری زیاد نسبت به انواع دیگر خشک‌کن به‌کار گرفته می‌شوند[۶].

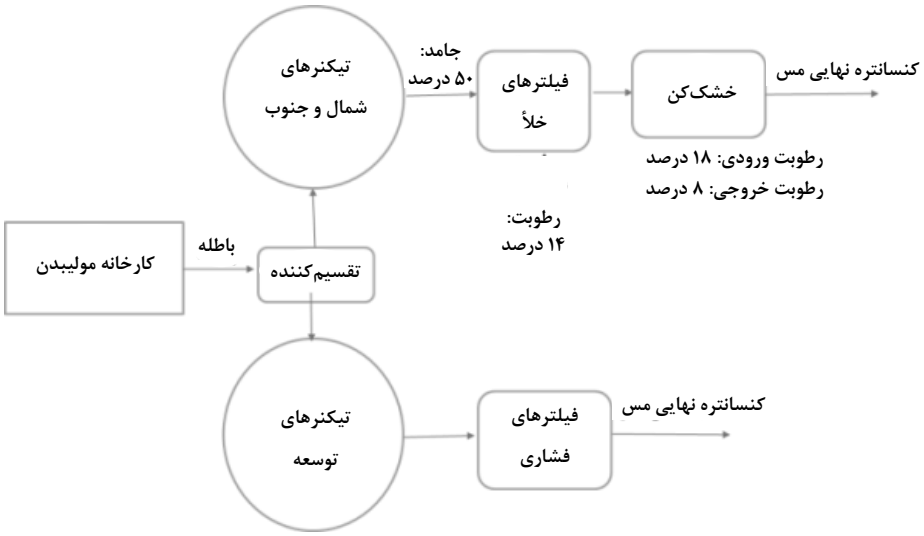
۱-۲ خشک‌کن‌های مجتمع مس سرچشمه

در مجتمع مس سرچشمه دو مدار موازی و مختلف برای آبگیری از کنسانتره نهایی مس نصب شده است. در مدار اول، بخشی از پالپ غلیظ کنسانتره مس (ته‌ریز تیکنرهای مس با درصد جامد ۵۰) وارد فیلترهای خلأ می‌شود که طبق طرح اولیه کارخانه محصول این واحد باید کیکی با رطوبت ۱۴ تا ۱۸ درصد باشد. این کیک به خشک‌کن گردان منتقل می‌شود و رطوبت آن به ۸ درصد کاهش می‌یابد و در نهایت محصول خشک‌کن به عنوان کنسانتره نهایی مس از کارخانه تغلیظ خارج می‌شود. در مدار دوم، بخش دیگر ته‌ریز تیکنرهای مس به فیلترهای فشاری ارسال می‌شود. فیلترهای فشاری باید محصولی با رطوبت ۸ درصد را به عنوان محصول نهایی تولید کنند[۷] (شکل (۱)).

مدار خشک‌کنی کنسانتره مجتمع مس سرچشمه شامل دو خشک‌کن موازی است که هر کدام شامل مشعل، کانال انتقال هوای گرم، مارپیچ خوراک دهی، خشک‌کن گردان، تجهیزات خروج هوای گرم و بازیابی غبارند. در این کارخانه معمولاً باید همواره یک خشک‌کن در حال کار و دیگری به صورت آماده به کار باشد.

در این کارخانه هر خشک‌کن شامل دو بخش ثابت و متحرک است. بخش ثابت خشک‌کن شامل مشعل، دمنده هوای گرم، کانال انتقال هوای گرم یا همان محفظه احتراق باشد که توسط مواد نسوز عایق کاری شده و بخش متحرک خشک‌کن استوانه فلزی گردانی به طول ۲۷/۴۳ و قطر ۳/۶۵ متر از جنس فولاد ضد زنگ به ضخامت ۱۸ میلی‌متر است (شکل (۲)). در استوانه گردان بار درون خشک‌کن از طریق آسترهای مختلفی که نقش بالابری را دارند در معرض

1. Co-Current
2. Counter Current

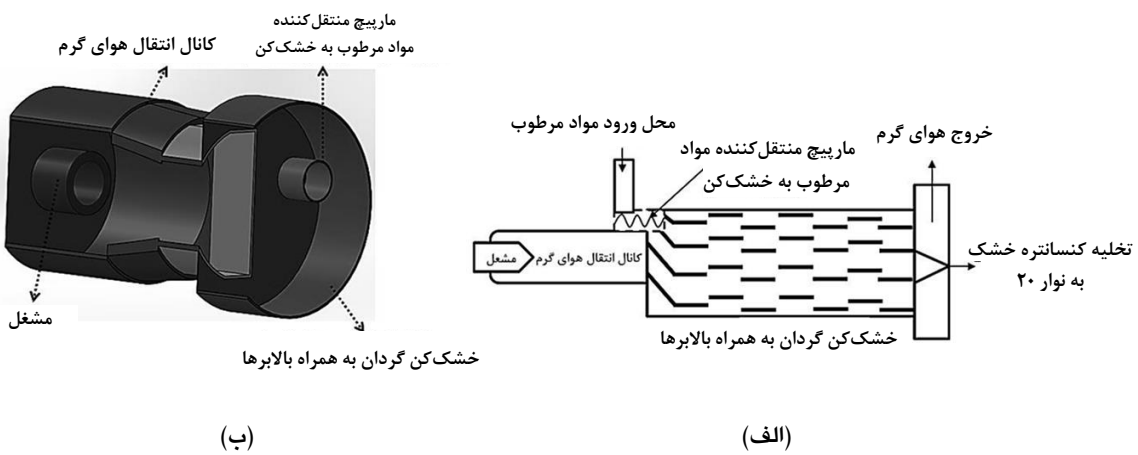


شکل ۱. مدار آبگیری و خشک‌کنی کنسانتره مجتمع مس سرچشمه.

هوای گرم قرار داده می‌شود. البته، نخستین ردیف بالابر به شکل مورب طراحی شده تا به حرکت رو به جلوی مواد کمک کند. همچنین، سه ردیف ضربه‌زن روی جداره بیرونی خشک‌کن دوار برای جدا کردن ذرات کنسانتره چسبیده به بدنه کار گذاشته شده. در هر ضربه‌زن یک گلوله فلزی قرار داده شده که با سقوط آزاد به بدنه خشک‌کن ضربه زده و ذرات کنسانتره چسبیده به بدنه را جدا می‌کند. در این مدار کنسانتره مرطوب توسط یک خوراک دهنده مارپیچی، به ابتدای خشک‌کن گردان منتقل می‌شود. مارپیچ گردان موازی با کانال انتقال هوای گرم قرار دارد. در جدول (۱) مشخصات خشک‌کن‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات خشک‌کن[۷].

مشخصه	میزان طراحی
طول (متر)	۲۷/۴۳
قطر (متر)	۳/۶۵
ظرفیت (t/h)	۷۵
رطوبت خوراک (٪)	۱۴ تا ۱۸
رطوبت محصول خشک‌کن (٪)	۶ تا ۷
اندازه ذرات خوراک	۹۰ درصد زیر ۴۴ میکرون



(ب) (الف)

شکل ۲. اجزای مختلف خشک‌کن؛ (الف) کلیه تجهیزات، (ب) نمای سه بعدی بخش ثابت خشک‌کن.

یکی از روش‌های ایجاد محیطی با دمای زیاد، بهره‌گیری مستقیم از جریان هوای گرم حاصل از احتراق سوخت هیدروکربنی (گرمادهی مستقیم) است، در حالی که در روش، نامستقیم دیواره خشک‌کن با استفاده از انرژی برق و یا توسط روغن گرم و دیگر روش‌ها حرارت داده می‌شود[۸]. در بیشتر صنایع فرآوری مواد معدنی، بهره‌گیری از خشک‌کن‌های با گرمای مستقیم و هم جهت، به دلیل برخورداری از ظرفیت و کارایی حرارتی بالا مرسوم است[۹]. در خشک‌کن‌های مجتمع مس سرچشمه نیز مسیر حرکت بار و حرارت مشعل همسوست. مسیر هوای گرم مجهز به دو دمنده هواست که یکی از آنها هوای لازم برای احتراق با ظرفیت حداکثر $۶۱۲۰ m^3/h$ و دیگری هوای رقیق سازی احتراق با ظرفیت $۴۸۰۰۰ m^3/h$ (حداکثر) را تأمین می‌کند. همچنین، از یک مکنده هوا در انتهای خشک‌کن گردان برای هدایت جریان هوای گرم به داخل خشک‌کن و جریان یافتن ذرات کنسانتره معلق درون خشک‌کن به سمت خروجی، استفاده شده و سرعت چرخش خشک‌کن ۲/۲۵rpm است.

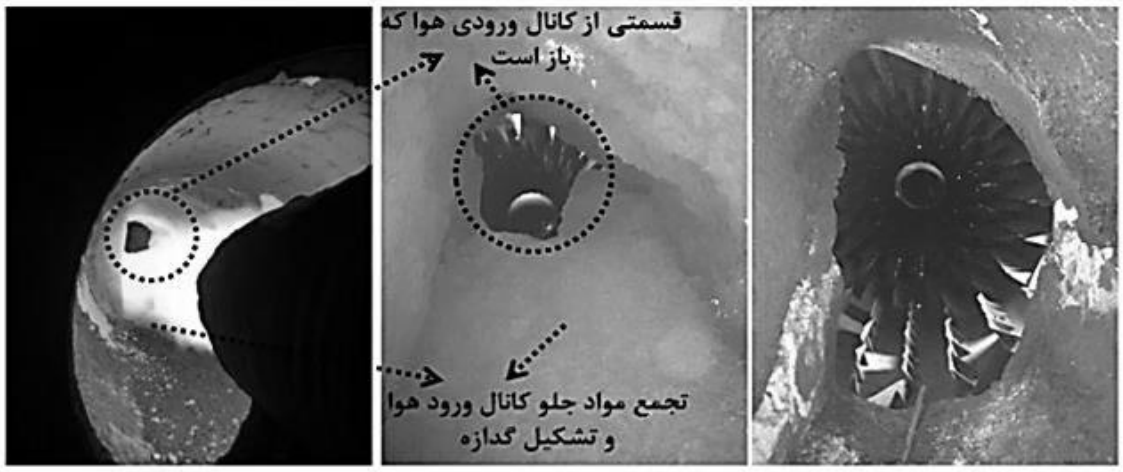
در محفظه احتراق، بر اساس آهنگ از پیش تعیین شده نسبت سوخت و هوا، احتراق انجام می‌شود. نقطه مطلوب مقدار جریان سوخت و نسبت هوا به سوخت را دمای خروجی خشک‌کن کنترل می‌کند. اگر دمای انتهای کانال هوای گرم یا دمای گاز خروجی خشک‌کن بسیار زیاد یا بسیار کم باشد، به مراقبت کار هشدار خطر داده می‌شود. در چنین شرایطی مراقبت کار باید حجم سوخت و هوا را چنان تنظیم کند که به تدریج دمای انتهای خشک‌کن به حداکثر ۱۷۵ درجه سلسیوس و دمای انتهای کانال هوای گرم به حداکثر ۳۵۰ درجه سلسیوس برسد (هر دو شرط برقرار باشد)؛ در غیر این صورت شرایط برای ادامه کار خشک‌کن فراهم نبوده و باید خشک‌کن به صورت اضطراری متوقف شود.

طراحی خشک‌کن مجتمع مس سرچشمه چنان است که محل ورود کنسانتره مرطوب (کیک فیلتر) به درون بخش متحرک خشک‌کن، نزدیک به انتهای کانال انتقال هوای گرم است. بنابراین، هنگام ورود کنسانتره مرطوب به خشک‌کن گردان بخشی از آن به درون کانال انتقال هوای گرم پرتاب شده و با گذشت زمان در انتهای کانال انباشته می‌شود. انباشت مواد با رطوبت زیاد در انتهای کانال انتقال هوای گرم و در معرض هوای گرم قرارگرفتن باعث تشکیل گدازه محکم شده و بعد از مدتی مسیر انتقال هوای گرم مسدود می‌شود. در این خشک‌کن از طریق دریچه بازدید مجاور مشعل (سر بخش ثابت خشک‌کن) امکان بازدید کانال انتقال هوای گرم در هنگام کار وجود دارد. در شکل (۳) تصاویری را از کانال انتقال هوای گرم در حالت‌های مختلف که از طریق این دریچه ثبت شده مشاهده می‌شود. با مسدود شدن مسیر انتقال هوای گرم (شکل (۳)- پ)، دمای انتهای کانال هوای گرم (انتهای محفظه احتراق) افزایش می‌یابد و بنابراین گرمای تولید شده در مشعل کاملاً به انتهای خشک‌کن منتقل نمی‌شود و دمای انتهای خشک‌کن کاهش و در نتیجه رطوبت محصول افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با انسداد انتهای کانال انتقال هوای گرم کارآیی خشک‌کن پایین می‌آید و خشک‌کن باید متوقف شود.

طبق طرح اولیه دوره کاری این خشک‌کن‌ها ۳۶۰ روز در سال پیش‌بینی شده است اما در حال حاضر به دلیل گرفتگی کانال انتقال هوای گرم، خشک‌کن باید پس از حدود ۷ روز کاری متوقف شود. علاوه بر این، دست‌کم ۴ روز کاری نیز برای آماده سازی مجدد خشک‌کن متوقف شده زمان لازم است. همچنین، در هر بار توقف خشک‌کن باید حرارت خشک‌کن کاهش یابد تا امکان رفع انسداد توسط نیروی انسانی فراهم آید. بنابراین، هزینه‌هایی مانند گرمایش، توقف، نیروی انسانی و نیز انرژی مورد نیاز برای راه اندازی مجدد هدر داده می‌شوند. بنابراین افزایش دوره کارکرد خشک‌کن (جلوگیری از مسدود شدن سریع کانال انتقال هوای گرم) به دلیل تأثیر در افزایش کارایی و زمان دسترسی این بخش علاوه بر کاهش هزینه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

۲. روش کار

به منظور بررسی دقیق نحوه کار خشک‌کن و علت‌یابی این مشکل مهم (انسداد کانال انتقال هوای گرم) و نیز برای دست‌یابی به تحلیل مناسب این رخداد روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. به دلیل تغییر در رطوبت، چسبندگی مواد و حجم بار ورودی به خشک‌کن در مدت زمان کارکرد و نیز در روزهای مختلف، باید روشی اختیار شود که نتایج آن به واقعیت بسیار نزدیک و قابل استناد باشد. یکی از بهترین روش‌های مستندسازی به منظور بازرسی فرایند بهره‌گیری از تصویر برداری است. با استفاده از این روش می‌توان مسیر دقیق و واقعی حرکت بار در خشک‌کن را بررسی کرد.



(الف) (ب) (پ)

شکل ۳. انتهای کانال انتقال هوای گرم: (الف) حالت کاملاً باز (قبل از شروع کار)؛ (ب) حالت خاموشی مشعل و انسداد بخشی از کانال؛ (پ) حالت اشتعال مشعل و انسداد بخشی از کانال.

به منظور مشاهده دقیق حرکت بار درون خشک‌کن و نحوه ورود مواد به داخل کانال انتقال هوای گرم، ابتدا خشک‌کن کاملاً تخلیه و نور کافی برای تصویربرداری تأمین و دوربین فیلم‌برداری با کیفیت مناسب در بخش ثابت خشک‌کن (درون کانال هوای گرم) نصب شد. آنگاه، در حالت خاموشی مشعل، بخش گردان خشک‌کن روشن و باردهی انجام شد. همزمان با باردهی به خشک‌کن فیلمبرداری از روند نیز شروع شد. به این ترتیب، نحوه ریزش بار، برخورد بار به بدنه، سمت و سوی برخورد، حرکت بار و میزان پرتاب مواد به داخل مسیر انتقال هوای گرم مشخص و سپس بررسی و تحلیل شد. برای مشخص شدن محل ریزش بار در خشک‌کن، قطر فرضی عمودی در محیط خشک‌کن به عنوان زاویه صفر و درجه‌بندی آن از پایین‌ترین نقطه خشک‌کن در خلاف جهت چرخش عقربه‌های ساعت در نظر گرفته شد.

برای درک دقیق نحوه عملکرد و کارایی خشک‌کنی باید تغییرات دمایی در امتداد طول خشک‌کن بررسی شود، زیرا وقوع تغییر در هر کدام از بخش‌های خشک‌کن بر نیمرخ دمایی و تغییرات آن در طول زمان تأثیر خواهد نهاد. از این‌رو با بهره‌گیری از داده‌های دمایی (دمای سر محفظه احتراق، انتهای محفظه احتراق و دمای انتهای خشک‌کن که به صورت ساعتی ثبت می‌شوند)، وضعیت تغییرات دمایی در طول دوره کاری خشک‌کن بررسی شد. همچنین در طول مدت کارکرد خشک‌کن، به صورت روزانه از محل دریچه بازدید، با استفاده از دوربین با کیفیت بالا، میزان انسداد کانال عکس‌برداری و سپس با تحلیل تصویر میزان پرشدگی آن اندازه‌گیری شد.

۳. ارایهٔ یافته‌ها و تحلیل نتایج

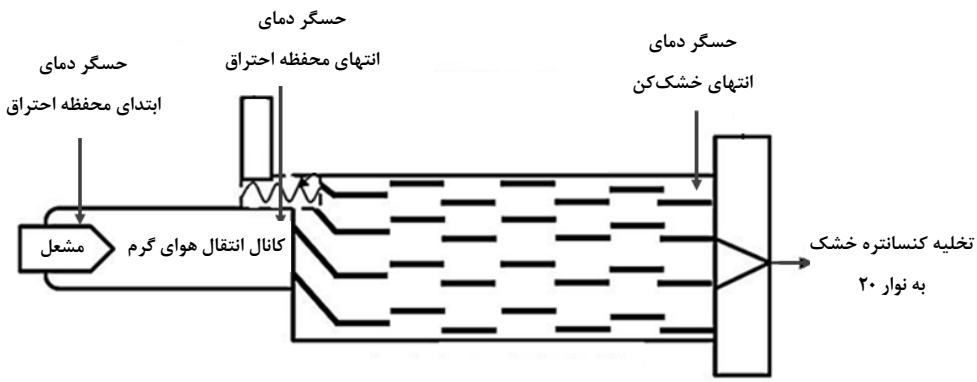
بنابر بررسی‌های انجام شده، در حال حاضر با توجه به عملکرد فیلترهای خلأ، تناژ ورودی به خشک‌کن از ۷۵ تن بر ساعت طرح اولیه به حدود ۴۵ تن بر ساعت کاهش و رطوبت خوراک نیز از ۱۸ به ۲۰ درصد افزایش یافته است. با توجه به این‌که افزایش رطوبت خوراک نسبت به طرح اولیه ناچیز ولی کاهش تناژ خوراک زیاد است، انتظار افزایش عملکرد خشک‌کن نسبت به طرح اولیه وجود دارد، بنابراین تغییرات مشخصات خوراک عامل کاهش کارایی خشک‌کن نیست. از سوی دیگر، بررسی حرکت بار در خشک‌کن نشان می‌دهد که دلایل اصلی پاشش مواد به کانال انتقال هوای گرم ریزش مواد روی هم، ریزش مواد از بالابرهای ابتدایی خشک‌کن به طرف کانال انتقال هوای گرم و برخورد مواد بر روی بدنه مارپیچ خوراک‌دهنده‌اند. بالابرهای موجود در محفظه گردان خشک‌کن بار مرطوب را تا موقعیت تقریبی ۱۸۰ درجه (موقعیت ساعت ۱۲:۰۰) بالا می‌برد و در این موقعیت بعد از وارد شدن ضربه از جانب

گلوله‌های ضربه‌زن، مواد از بدنه خشک‌کن جدا می‌شوند. این مواد بعد از سقوط به دلیل وجود رطوبت در آن‌ها به اطراف پخش و بخشی از آنها نیز به درون کانال ورود هوا پرتاب و در دراز مدت (حدود ۷ روز) موجب مسدود شدن کانال ورود هوا می‌شوند.

در سیستم کنترلی بخش خشک‌کن به منظور پایش دما در سه نقطه مختلف حسگرهای دمایی نصب شده (شکل (۴)) تا اپراتورها با توجه به این داده‌ها در مورد اعمال تغییرات در میزان سوخت، میزان هوا و یا میزان باردهی به خشک‌کن تصمیم‌گیری می‌کنند و در صورت نیاز به توقف خشک‌کن اقدام کنند.

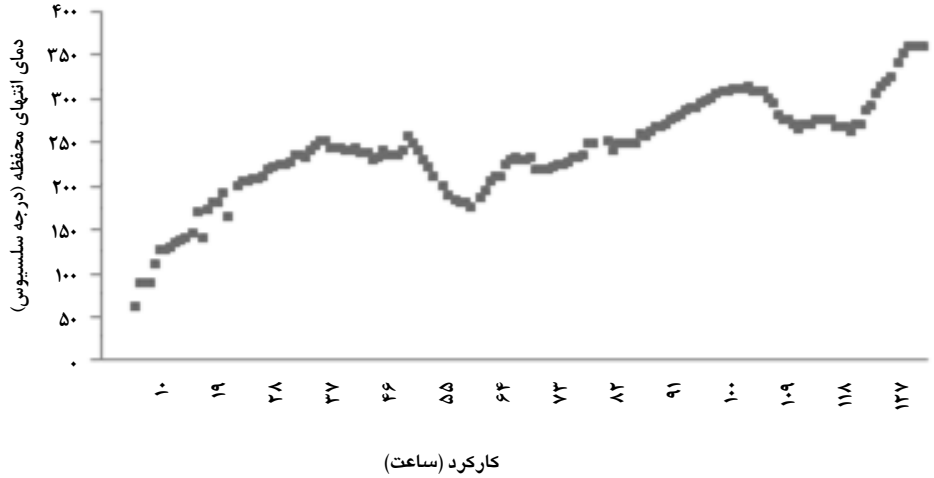
۳-۱ تغییرات دمایی خشک‌کن

به منظور مشخص کردن دقیق تغییرات دمای نقاط مختلف خشک‌کن در طول دوره کاری خشک‌کن، تغییرات دمای نقاط مختلف خشک‌کن قبل از اعمال تغییرات بررسی شد (شکل‌های ۵ تا ۷). مدت زمان کارکرد خشک‌کن معمولاً حدود ۷ روز است و در این مدت دمای ابتدای محفظه احتراق به دلیل گرفتگی انتهای کانال انتقال هوای گرم و عدم امکان خروج هوای گرم از خشک‌کن به حدود ۷۰۰ درجه سلسیوس (شکل (۵)) می‌رسد. همچنین، در همین مدت دمای انتهای کانال هوای گرم نیز به بیش از دمای بحرانی یعنی ۳۵۰ درجه سلسیوس (شکل (۶)) می‌رسد و با توجه به عدم انتقال هوای گرم به بخش گردان دمای انتهای محفظه گردان نیز به طور طبیعی تا حدود ۵۰ درجه سلسیوس (شکل (۷)) کاهش می‌یابد که بسیار کمتر از دامنه معمول ۹۰ تا ۱۷۵ درجه است و در نتیجه به صورت اضطراری خشک‌کن متوقف می‌شود.

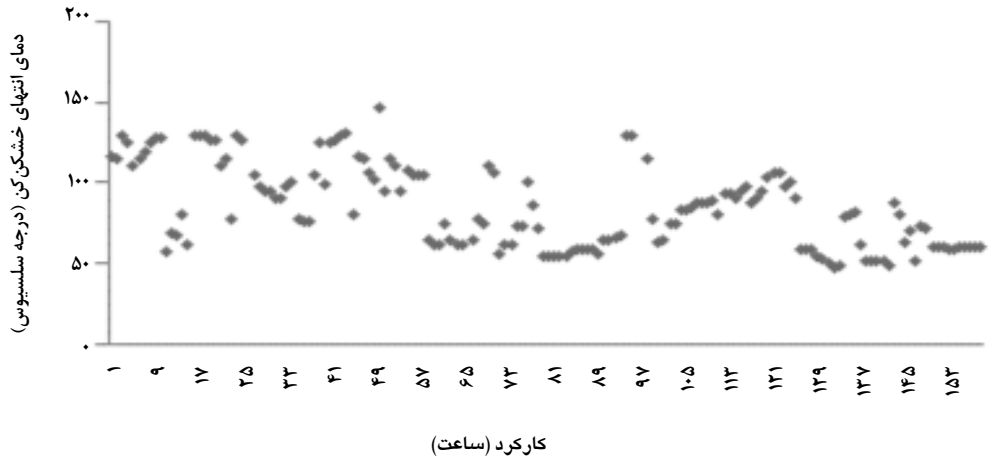


شکل ۴. محل حسگرهای دما در خشک‌کن.

شکل ۵. روند تغییرات دمای ابتدای محفظه احتراق.



شکل ۶. روند تغییرات دمای انتهای محفظه احتراق.



شکل ۷. روند تغییرات دمای انتهای خشک‌کن.

۳-۲ راه‌های افزایش کارایی خشک‌کن

مهمترین مشکل خشک‌کن، مسدود شدن کانال انتقال هوای گرم و اساسی‌ترین دلیل انسداد این کانال، پاشش بار مرطوب به کانال انتقال هوای گرم است. به دلیل مرطوب و چسبنده بودن بار ورودی، این مواد بعد از سقوط به اطراف پخش و بخشی از آن‌ها نیز به درون کانال ورود هوا پرتاب می‌شود که در دراز مدت موجب انسداد کانال ورود هوا خواهد شد. بنابراین، یکی از راه‌های بهبود کارایی خشک‌کن، کاهش رطوبت مواد ورودی با افزایش کارایی واحد فیلترکُنی است؛ که البته مقایسه رطوبت ورودی با طرح اولیه نشان می‌دهد این راه نمی‌تواند کمک زیادی به جلوگیری از انسداد کانال انتقال هوای گرم کند. یکی دیگر از راه‌ها، ناهمسو کردن حرکت بار و گرماست. در این روش، بازدهی گرمایی دستگاه افزایش می‌یابد و مشکل گرفتگی کانال انتقال هوای گرم حذف می‌شود. در این روش، باید محل ورود و خروج مواد یا محل استقرار مشعل جابه‌جا شود که به هیچ عنوان قابلیت اجرا ندارد.

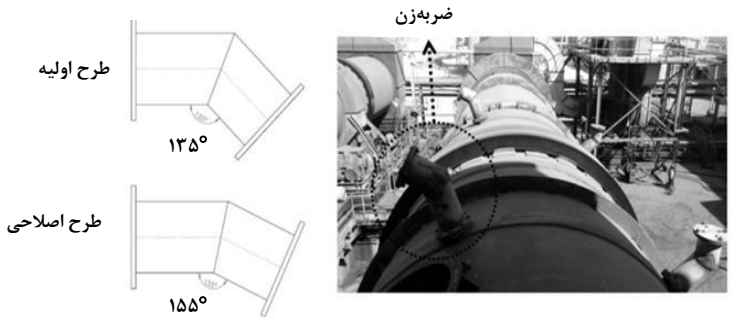
علاوه بر این می‌توان با ایجاد تغییر در ضربه‌زن، شکل بالابرهای درون خشک‌کن و انحنای بالایی کانال انتقال هوای گرم مانع پرتاب مواد به این محل شد، که در این تحقیق سعی شده از پرتاب مواد به داخل کانال انتقال هوای گرم با استفاده از این روش‌ها جلوگیری شود.

۳-۲-۱ تغییر زاویه ضربه زدن گلوله‌های ضربه‌زن

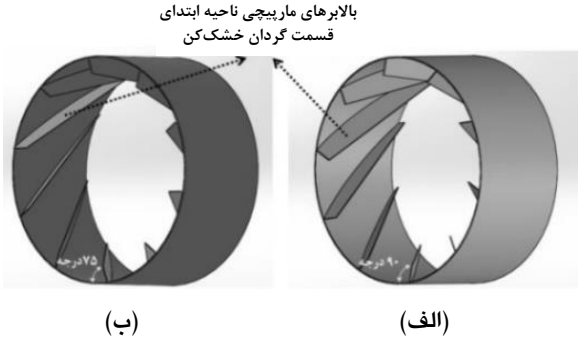
در این خشک‌کن‌ها با توجه به درجه و رطوبت در مواد، احتمال چسبیدن آن‌ها به بدنه و در معرض گرما قرارنگرفتن وجود دارد. از این رو در ابتدای محفظه گردان، گلوله‌های فلزی در پشت محفظه برای ضربه زدن و کمک به رهایی مواد مرطوب چسبیده شده به بدنه تعبیه شده است. گلوله‌ها درون یک محفظه استوانه‌ای قرار دارند و محفظه همراه با بخش گردان خشک‌کن حرکت می‌کند و در حدود موقعیت ۱۸۰ درجه (ساعت ۱۲:۰۰) گلوله‌ها درون محفظه سقوط آزاد می‌کنند و به سطح بیرونی بخش گردان خشک‌کن ضربه می‌زنند. محفظه گلوله‌ها از دو لوله متقاطع تشکیل می‌شود و با تغییر زاویه بین دو لوله می‌توان موقعیت برخورد گلوله به بدنه را تغییر داد. بنابراین، با توجه به نیاز به برخورد زودتر گلوله‌ها به بدنه می‌توان با تغییر زاویه بین دو لوله حرکت گلوله را چنان تغییر داد که در موقعیت حدود ۱۵۰ درجه به محفظه گردان خشک‌کن برخورد کند، زیرا در این صورت مواد در ارتفاع پایین‌تری از بدنه خشک‌کن جدا می‌شود و احتمال پرتاب کمتری به درون کانال انتقال هوای گرم دارند. از این رو زاویه زانویی ضربه‌زن از ۱۳۵ به ۱۵۵ درجه افزایش و موقعیت سقوط گلوله ضربه‌زن از زاویه ۱۸۰ به ۱۵۰ درجه کاهش یافت (شکل (۸)).

۳-۲-۲ تغییر زاویه بالابری آسترهای ابتدایی

در بخش داخلی خشک‌کن‌های گردان غالباً صفحاتی وجود دارد که به آنها بالابر یا صفحات پرواز گفته می‌شود[۱۰]. در خشک‌کن‌های گردان هندسه بالابرها و میزان ذرات جامد درون آنها بر قابلیت انتقال این ذرات از طریق هوا نقش مهمی دارد[۱۱]. پس از تغییر طرح ضربه‌زن، آزاد شدن بار چسبیده به بدنه محفظه گردان در حدود موقعیت ۱۵۰ درجه صورت می‌گیرد، از سوی دیگر، زاویه بالابرهای درون محفظه گردان نقش مهمی در نقطه آزاد شدن بار داخل محفظه گردان خشک‌کنی دارد و زاویه آزاد شدن بار باید چنان باشد که در لحظه‌ای که ضربه گلوله به بدنه خشک‌کن وارد می‌شود بار از روی صفحات بالابر نیز بتواند حرکت کند[۱۲]. از این رو زاویه بالابرها با بدنه از ۹۰ به ۷۵ درجه کاهش داده شد (شکل (۹)).



شکل ۸. طرح و محل نصب محفظه گلوله ضربه‌زن: (الف) نمای کلی ضربه‌زن‌های خشک‌کن؛ (ب) تغییر طراحی ضربه‌زن‌ها.



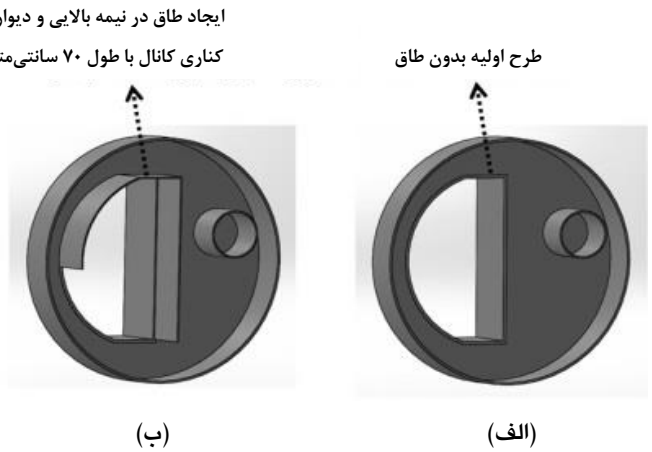
شکل ۹. کاهش زاویه بالابرهای مارپیچی ابتدایی بدنه خشک‌کن گردان از ۹۰ به ۷۵ درجه؛ (الف) قبل از تغییر؛ (ب) پس از تغییر.

۳-۲-۳ ساختن طاق در بخش انتهایی کانال انتقال هوای گرم

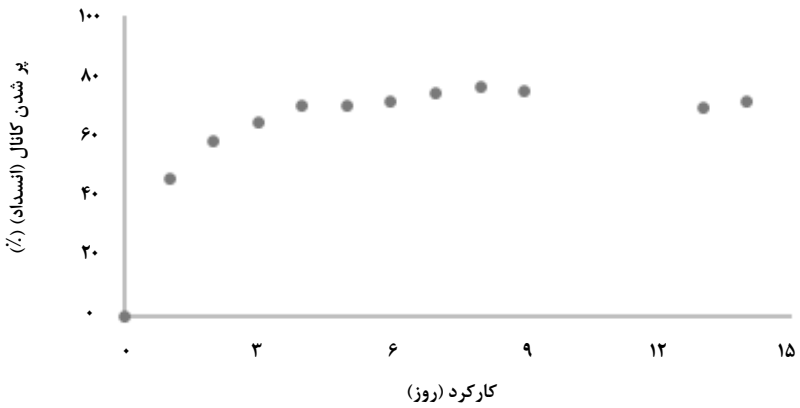
بررسی نحوه پرتاب شدن مواد به درون کانال انتقال هوای گرم نشان داد که احتمال ورود بخشی از مواد پخش شده از طریق اولین ردیف بالابرها به درون کانال انتقال هوای گرم زیاد است. بنابراین، در صورتی که قسمت فوقانی کانال انتقال هوای گرم (سقف کانال) به درون بخش گردان خشک‌کن امتداد یابد، محل ریزش بار از انتهای کانال فاصله می‌گیرد و احتمال پاشش مواد از نیمه بالایی به درون کانال کاهش می‌یابد. همچنین، برخورد مواد با خوراک دهنده مارپیچی و پاشش به درون کانال انتقال هوای گرم یکی دیگر از دلایل انسداد کانال تشخیص داده شد. بنابراین، امتداد دیواره بین مارپیچ و کانال انتقال هوای گرم در کاهش حجم پاشش مواد از این ناحیه موثر است. از این رو سقف کانال (طاق کانال) به علاوه دیواره کناری با بهره‌گیری از صفحات فلزی و مواد نسوز به طول ۷۰ سانتی‌متر به داخل محفظه گردان خشک‌کن ادامه داده شد. در شکل (۱۰) طرح اولیه و طرح اجرا شده در انتهای کانال هوای گرم مشاهده می‌شود.

۳-۳ پایش میزان انسداد انتهای کانال هوای گرم

پس از انجام تغییرات، روزانه از میزان پرشدگی و انسداد بخش خروجی کانال عکس برداری و میزان پرشدگی با استفاده از تحلیل تصاویر تعیین شد. بررسی عکس‌ها در ۱۴ روز ابتدای کارکرد نشان می‌دهد که در روز اول کارکرد تا حدود ۴۵ درصد از سطح باز کانال مسدود شده (شکل (۱۱)) ولی پس از آن سرعت انسداد به شدت کاهش می‌یابد و تقریباً بعد از ۷ روز کاری میزان انسداد به میزان ثابت حدوداً ۷۵ درصدی رسید.



شکل ۱۰. طرح نموداری ایجاد طاق در انتهای کانال هوای گرم: (الف) طرح اولیه بدون طاق؛ (ب) ایجاد طاق در نیمه بالایی و دیواره کناری.



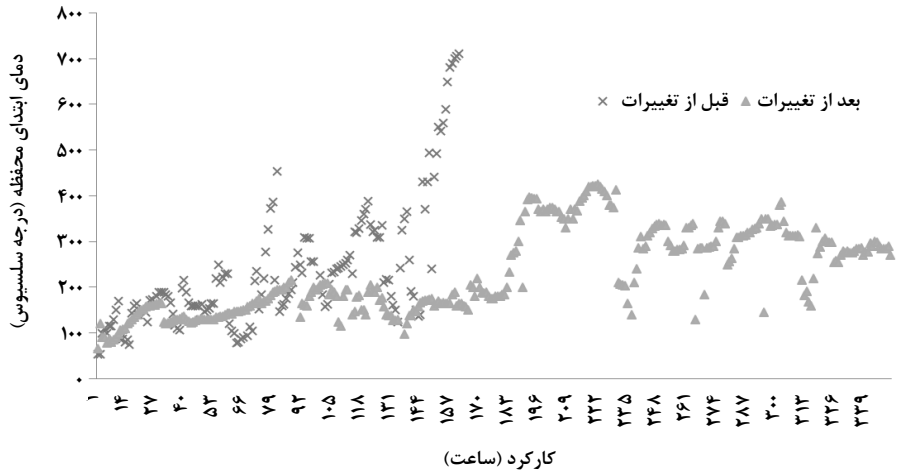
شکل ۱۱. روند انسداد کانال انتقال هوای گرم در ۱۴ روز ابتدای راه اندازی خشک‌کن.

۳-۴ بررسی تاثیر تغییرات در زمان کارکرد خشک‌کن

به منظور مشخص کردن تأثیر دقیق تغییرات اعمال شده، میانگین ساعت‌های کارکرد خشک‌کن، قبل و بعد از تغییرات با هم مقایسه شد. بنابر نتایج به دست آمده، تغییرات باعث شده که مدت زمان انسداد کانال انتقال هوا در خشک‌کن از متوسط حدود ۷ روز به ۱۸ روز افزایش یابد. تغییرات اعمال شده باعث شده که در این مدت دمای ابتدای محفظه احتراق در محدوده طبیعی حدود ۳۵۰ درجه تغییر کند؛ در حالی که در دوره‌های قبلی این دما به حدود ۷۰۰ درجه سانتی گراد نیز می‌رسید (شکل (۱۲)). همچنین، دمای انتهای محفظه احتراق نیز که قبل از انجام تغییرات در مدت زمان حدود ۱۵۰ ساعت کاری به ۳۶۰ درجه رسیده بود بعد از اعمال تغییرات در مدت زمان بیش از ۳۳۰ ساعت کاری به حدود ۳۴۰ درجه سلسیوس رسید (شکل (۱۳)).

دمای انتهای محفظه گردان خشک‌کنی با توجه به تاثیر بر کاهش رطوبت محصول، از عوامل بسیار مهم است. بررسی تاثیر تغییرات در دمای این نقطه نشان می‌دهد که قبل از اعمال تغییرات بعد از حدود ۱۲۰ ساعت کاری دما در این نقطه به حدود ۶۰ درجه کاهش می‌یافت که به معنای عدم توانایی در کاهش رطوبت است، ولی بعد از اعمال تغییرات دما در این نقطه حتی بعد از حدود ۳۳۰ ساعت کاری در حدود ۸۰ درجه باقی مانده است (شکل (۱۴)).

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات انجام شده در این خشک‌کن باعث افزایش نسبی بیش از ۱۰۰ درصدی کارایی خشک‌کن شده است.



شکل ۱۲. تغییرات دمای ابتدای محفظه احتراق قبل و بعد از تغییرات.

شکل ۱۳. تغییرات دمای انتهای محفظه احتراق قبل و بعد از تغییرات.

شکل ۱۴. تغییرات دمای انتهای خشک‌کن قبل و بعد از تغییرات.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- انسداد کانال ورود هوای گرم به خشک‌کن به دلیل پاشش مواد به درون کانال، برخورد مواد مرطوب با مواد زیرین و با مارپیچ خوراک خشک‌کن و پرت شدن مواد به درون کانال انتقال هوای گرم است.
- با کاهش زاویه صفحات بالابر مارپیچی در ابتدای خشک‌کن از ۹۰ به ۷۵ درجه، زاویه رهایی بار کاهش می‌یابد و مواد مرطوب از ارتفاع کمتری پرتاب می‌شوند؛ بنابراین روند انسداد انتهای کانال انتقال هوای گرم با سرعت کمتری انجام می‌شود.
- با افزایش زاویه زانویی ضربه‌زن بدنه از ۱۳۵ به ۱۵۵ درجه و سقوط آزاد گلوله درون ضربه‌زن از زاویه ۱۸۰ به ۱۵۰ درجه، جداسازی مواد چسبیده به بدنه در ارتفاع کمتری رخ می‌دهد.
- با امتداد دادن سقف کانال انتقال هوای گرم (ایجاد طاق) به طول ۷۰ سانتیمتر به درون بخش گردان خشک‌کن، پاشش بار از ناحیه نیمه بالایی کانال به درون آن کاهش یافت.
- پس از اعمال تغییرات در خشک‌کن مجتمع مس سرچشمه، دوره کارکرد آن از میانگین حدود ۷ روز به ۱۸ روز کاری افزایش یافت.
- با توجه به تغییرات دمایی در طول دوره کارکرد، پس از اعمال تغییرات مشخص شد که دما در ابتدای محفظه احتراق بعد از انجام تغییرات نسبت به قبل از تغییرات از ۷۰۰ درجه به حدود ۳۵۰ درجه کاهش یافته در حالی که ساعت کارکرد آن تقریباً دو برابر افزایش یافت.
- پس از اعمال تغییرات، دمای انتهای خشک‌کن که تأثیر زیادی در کارآیی خشک‌کنی کنسانتره دارد بر خلاف قبل از تغییرات، روند نزولی ندارد و حول ۹۰ درجه تقریباً ثابت شده است؛ در حالی که قبل از اعمال تغییرات دمای این نقطه حتی به کمتر از ۶۰ درجه نیز می‌رسیده و باعث افزایش رطوبت کنسانتره نهایی می‌شده است.
- اصلاحات انجام شده در خشک‌کن باعث افزایش نسبی بیش از ۱۰۰ درصدی کارایی خشک‌کن شده‌اند.

۵. سپاسگزاری

از تمامی مدیران و پرسنل واحدهای امور تغلیظ و امور تحقیق و توسعه به خاطر همکاری صمیمانه ایشان و اجازه انتشار این تحقیق سپاسگزاری می‌کنیم.

مراجع

[1] Lewis, W. K., "The Rate of Drying of Solid Materials", J. Ind. Eng. Chem.Vol. 13, pp. 427-432, (1921).

[2] Mujumdar, A., Taylor, F., "Handbook of Industrial Drying", 3rd Ed, pp. 4-199, 1075-1078, CRC Press, (2007).

[3] Jim´enez, D., Casta˜no, F., Rubio, F. R., "QFT Control of a Rotary Dryer", European Control Conference (ECC), (2003).

[4] Chen, S. L., Mansikkaviita, H., "The Beneficial Effects of Feeding Dry Copper Concentrate to Smelting Furnaces and Development of the Dryers", Kumera Corporation, Technology Center, Riihimäki, Finland, (2006).

[5] Online Chemical Engineering Information, Data Basics for Rotary Dryers Available, www. kilburnengg.com.

[6] Cairo, N., Colangelo, G., Giuseppe, S., "Performance Analysis of two Industrial Dryers (cross flow and rotary)", for ligno-cellulosic biomass desiccation, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, (2012).

[7] National Iranian Copper Industries Company., "Drying Operation Manual", Concentrate Dryer, Parson Jordan Co., (1977).

[8] Olukayode Oludamilola, A., Tech (hons), B., "Multiscale Modelling of Industrial Flighted Rotary Dryers", James Cook University, (2011).

[9] Wills, B., Finch, J., "Wills Mineral Processing Technology", Elsevier, 8th Edition, pp. 417-437, (2016).

[10] Hoo-Kyung, L., Sangmin, C., "Lifter Design for Enhanced Heat Transfer in A Rotary Kiln Reactor", Journal of Mechanical Science and Technology 27, pp. 3191–3197, (2013).

[11] Malode, P., Chhangani, R., Datta, A., Basu, B., "DEM Analyses of the Role of Lifter Design on Performance of Rotary Cooler", Proceedings of the XI International Seminar on Mineral Processing Technology, pp. 391–397, (2010).

[12] Fakouri, A., "A New Experimental Method for Flight in Rotary Dryers", Department of Mechanical Engineering, URMIA University of Technology (UUT), (2014).