نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره ۱۴، شماره ۴۵، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۵ تا ۳۴
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol 14, No 45, 2020, pp 25-34

استانداردسازی راهبری مدار سنگ‌شکنی و سرندکنی مرحله سوم مجتمع مس‌سرچشمه از طریق بازرسی فرآیند

سعید زارع[۱]، مصطفی مالکی مقدم[۲*]، محسن یحیایی[۳]، صمد بنیسی[۴]

۱. کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، مرکز تحقیقات کاشی‌گر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، zaresaeed1993@gmail.com
۲. استادیار فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران، m.maleki@vru.ac.ir
۳. دانشیار فرآوری مواد، مرکز تحقیقات فرآوری JK، دانشگاه کوئیزلند، استرالیا، m.yahyaei@uq.edu.au
۴. استاد فرآوری مواد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، banisi@uk.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۵)

چکیده

معمول‌ترین راه بیشینه کردن ظرفیت مدارهای سنگ‌شکنی، حفظ توان‌کشی اسمی و پر بودن محفظه سنگ‌شکن در بالاترین حد ممکن است. این هدف با استفاده از حلقه کنترل توان‌کشی و کنترل سطح محفظه سنگ‌شکن قابل دستیابی است. بازرسی‌های انجام شده در مدار سنگ‌شکنی مرحله سوم کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس‌سرچشمه نشان داد کارآیی خردایش پایین بوده و حلقه‌های کنترل سنگ‌شکنی مورد استفاده قرار نمی‌گرفت. برای راه‌اندازی این حلقه‌ها، ابتدا داده‌های توان به اتاق کنترل انتقال داده شدند و سطح‌سنج فراصوت برای پایش سطح مواد در محفظه سنگ‌شکن عملیاتی شد. با توجه به وجود نوسان زیاد در توان‌کشی سنگ‌شکن‌ها و مشکلات اساسی مدار، کار استانداردسازی فرآیند و تجهیزات با استفاده از بازرسی فرآیند به اجرا گذاشته شد. مشکل اول، توزیع غیریکنواخت خوراک در سنگ‌شکن‌ها بود. با تغییر طرح مجرای خوراک سنگ‌شکن‌ها طی سه مرحله، از طرح مکعب مستطیل به مجرای خوراک استوانه‌ای استاندارد، توزیع خوراک یکنواخت شد که باعث افزایش عمر زره ثابت (۱٫۸ برابر) و کاهش نوسان توان‌کشی (از ۸٫۵ به ۳٫۲ کیلووات) شد. پایین بودن تناژ ورودی (۳۵۰ تن در ساعت) به سنگ‌شکن‌ها نسبت به طرح (۵۳۱ تن در ساعت) مشکل بعدی بود. با افزایش ارتفاع صفحه تنظیم خوراک‌دهنده‌ها، رفع انسداد مخازن و افزایش سرعت خوراک‌دهنده‌ها، تناژ ورودی به سنگ‌شکن‌ها به صورت میانگین از ۳۵۰ به ۵۴۰ تن در ساعت افزایش و ساعت کارکرد سنگ‌شکن‌ها ۱۸ درصد کاهش یافت. به عبارتی، تعداد سنگ‌شکن آماده به کار از ۱ دستگاه به ۲٫۵ دستگاه افزایش یافت. با استانداردسازی فرآیند، حلقه کنترل خودکار توان‌کشی مورد استفاده قرار گرفت و امکان پر کار کردن محفظه سنگ‌شکن فراهم شد. استفاده از حلقه‌های کنترل باعث کاهش انسداد سنگ‌شکن از ۱۰ مرتبه در ماه به یک مرتبه و افزایش ۱۳ درصدی ذرات عبوری از سرند ۱۲٫۷ میلی‌متر شد. با عیب‌یابی و استانداردسازی سرندها، درصد عبوری از سرند ۱۲٫۷ میلی‌متر از ۶۵ به ۷۹٫۵ درصد افزایش یافت.

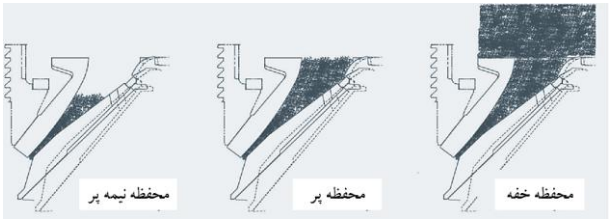
کلمات کلیدی

سنگ‌شکن مخروطی، خوراک‌دهنده، کنترل خودکار، سطح‌سنج، توان‌کشی.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

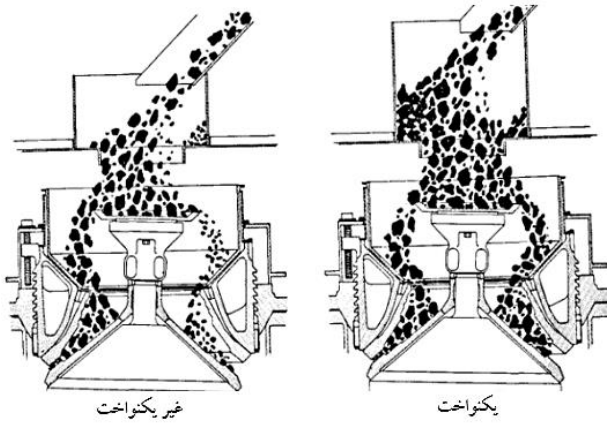
۱- مقدمه

برای افزایش کارآیی کارخانه‌های فرآوری و قبل از انجام عملیات بهینه‌سازی سیستم، استانداردسازی فرآیندها و تجهیزات مورد استفاده ضروری است [۱]. بالاترین انرژی مصرفی کارخانه‌های فرآوری (۴۰ تا ۵۰ درصد) و حتی حدود ۶ تا ۷ درصد از کل انرژی مصرفی دنیا، صرف خردایش می‌شود [۲]. سنگ‌شکن‌های مخروطی یکی از اجزا مهم در اغلب مدارهای خردایش‌اند. به دلیل تاثیر کارآیی سنگ‌شکن‌ها بر کارآیی تجهیزات پایین‌دست، استانداردسازی و بهینه‌سازی مدارهای سنگ‌شکنی همواره مورد توجه بوده است. بهبود کارآیی مدار سنگ‌شکنی علاوه بر کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی، موجب افزایش کارآیی مدارهای آسیاکنی در پایین دست نیز خواهد شد. معمول‌ترین هدف مدارهای سنگ‌شکنی مرحله دوم و سوم، بیشینه کردن ظرفیت سنگ‌شکن در یک اندازه محصول معین است. معمول‌ترین راه بیشینه کردن ظرفیت، حفظ توان‌کشی سنگ‌شکن در بالاترین حد ممکن است که با پر یا خفه کار کردن سنگ‌شکن (شکل ۱) انجام می‌شود و به وسیله بسیاری از کارخانه‌ها به کار گرفته می‌شود [۶-۳]. زمانی‌که سنگ‌شکن به صورت خفه کار کند، مواد به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند و شکست بین ذره‌ای باعث ایجاد ریزترک در سنگ می‌شود، در نتیجه در این حالت می‌توان محصول با دانه‌بندی یکنواخت‌تر و ریزتر تولید کرد [۱۰-۷].



شکل ۱- سنگ‌شکن بر اساس میزان مواد در محفظه [۱۰].

یکی از عوامل تاثیرگذار بر عملکرد سنگ‌شکن‌های مخروطی نحوه باردهی به آن‌ها است. استفاده از حداکثر کارآیی سنگ‌شکن‌ها به طور مستقیم با نحوه خوراک‌دهی به آن‌ها در ارتباط است. توزیع کاملا یکنواخت خوراک در محفظه سنگ‌شکن موجب یکنواختی در توان‌کشی سنگ‌شکن و همچنین سایش یکنواخت می‌شود، در نتیجه، در چنین شرایطی نه تنها سنگ‌شکن محصول یکنواخت‌تری تولید می‌کند بلکه عمر قطعات آن نیز افزایش می‌یابد. برای توزیع یکنواخت خوراک ورودی به سنگ‌شکن، لازم است جهت بار ورودی به روی سینی خوراک کاملا عمودی باشد (شکل ۲) [۱۳-۱۰].



شکل ۲- توزیع یکنواخت و غیریکنواخت خوراک سنگ‌شکن [۷].

در سال‌های اخیر، تحقیقات محدودی در سنگ‌شکن‌ها برای درک بهتر تاثیر پارامترهای مختلف روی عملکرد خردایش آن‌ها انجام شده است. یکی از این روش‌ها، روش اجزای گسسته[1] راگ است که در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. شبیه‌سازی با روش اجزای گسسته ابتدا در سال ۱۹۷۹ توسط کاندال[2] [۱۴] برای شبیه‌سازی رفتار دانه‌های خاک تحت بارگذاری دینامیکی ارایه شد. در زمینه فرآوری مواد معدنی در سال ۱۹۹۲، میشرا[3] و راجامانی[4] [۱۵]، با شبیه‌سازی دوبعدی حرکت بار در آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی و اعتبارسنجی نتایج آن با واقعیت، راگ را وارد این عرصه کردند. اخیرا از این روش در زمینه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سنگ‌شکن‌های مخروطی استفاده شده است [۲۰-۱۶].

علاوه بر این، از روش‌های دیگری برای افزایش کارایی سنگ‌شکن‌ها استفاده شده است. از جمله این موارد، استفاده از آب فلش برای ایجاد توانایی به منظور بیش از حد تنگ‌تر کردن دهانه بسته سنگ‌شکن بوده است [۶]. با استفاده از سیستم پیشرفته لیزری می‌توان از زره ثابت و متحرک تصویر سه بعدی آماده کرد [۲۱]. اخیرا اقداماتی برای ساخت سنگ‌شکن‌های مخروطی با حداکثر قابلیت ریزکنندگی در حالت عملیاتی خشک انجام شده است و از این سنگ‌شکن‌ها می‌توان به عنوان جایگزین آسیاکنی اولیه استفاده کرد [۲۲]. با توجه به پیشرفت روز افزون تکنولوژی، رقابت بین صنایع و تغییر سریع شرایط اقتصادی، کنترل و خودکارسازی فرآیندها، اهمیت بسیار ویژه‌ای یافته است. کنترل فرآیند به معنای کنترل خودکار یک

[1]- Discrete Element Method (DEM)
[2]- Cundall
[3]- Mishra
[4]- Rajamani

متغیر خروجی با پایش و اندازه‌گیری یک ویژگی از آن متغیر با استفاده از حسگر، مقایسه آن با یک نقطه مطلوب و ارسال یک سیگنال خروجی از کنترل‌کننده به عنصر نهایی کنترل برای انطباق متغیر خروجی با نقطه مطلوب است [۲۳].

۱-۱- مدار سرندکنی و سنگ‌شکنی مجتمع مس سرچشمه

مدار سنگ‌شکنی مجتمع مس سرچشمه از یک سنگ‌شکن اولیه (ژیراتوری) با ظرفیت ۵۰۰۰ تن بر ساعت، واحد سرندکنی اولیه شامل ۶ سرند لرزان، سه سنگ‌شکن ثانویه (مخروطی استاندارد) با حداکثر توان اسمی ۲۵۰ کیلووات و شش سنگ‌شکن مرحله سوم (مخروطی سرکوتاه) با حداکثر توان اسمی ۲۵۰ کیلووات در مدار بسته با سرندهای لرزان تشکیل شده است (شکل ۳) [۷]. در جدول ۱ مشخصات مربوط به سنگ‌شکن‌های مرحله دوم و سوم مجتمع مس سرچشمه نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات سنگ‌شکن‌های مجتمع مس سرچشمه.

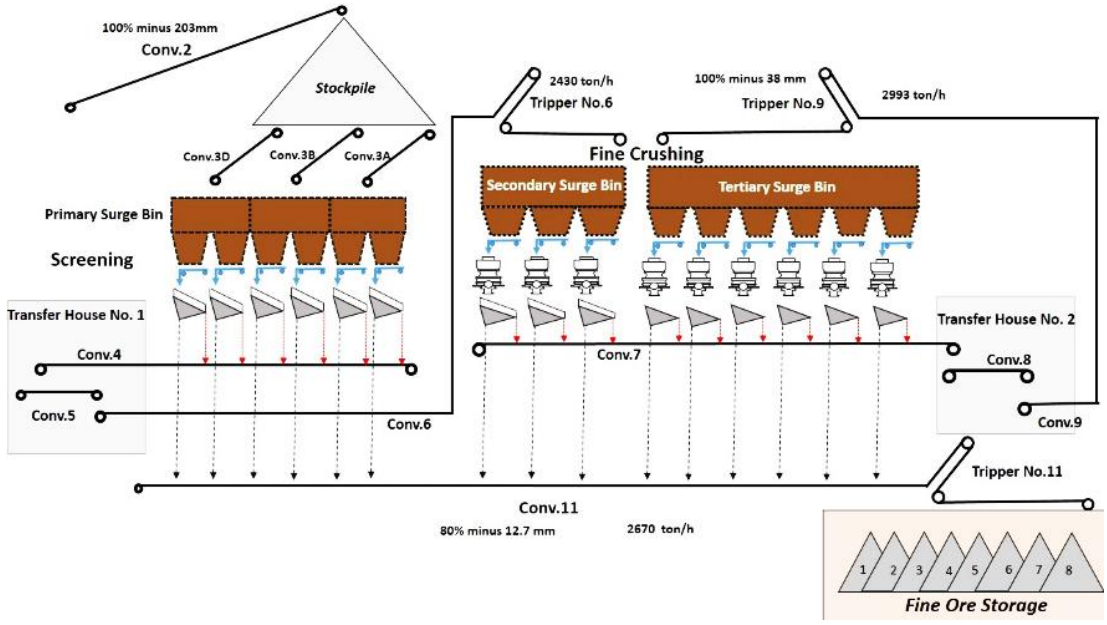
	سنگ‌شکن مرحله دوم	سنگ‌شکن مرحله سوم
اندازه	۷ فوت استاندارد	۴ فوت سر کوتاه
تناژ خروجی	۷۸۷ (تن در ساعت)	۵۳۱ (تن در ساعت)
دهانه بسته	۳۴ میلی‌متر	۱۲٫۷ میلی‌متر
حداکثر اندازه خوراک	۲۰۳ میلی‌متر	۷۶ میلی‌متر
حداکثر اندازه محصول	۷۶ میلی‌متر	۳۸ میلی‌متر

با توجه به نقش زیاد مدار سنگ‌شکنی و سرندکنی مرحله سوم مجتمع مس‌سرچشمه در تامین خوراک فرآیند پایین دست، در این تحقیق از طریق بازرسی فرآیند، تمام مواردی که باعث کاهش کارآیی مدار سنگ‌شکنی و سرندکنی مرحله سوم مجتمع مس‌سرچشمه شده بود، شناسایی شدند. پس از عیب‌یابی مدار از طریق بازرسی فرآیند، کار استانداردسازی فرآیند و تجهیزات با به کارگیری روش‌های عملیاتی، تعمیراتی و ابزار دقیق به اجرا گذاشته شد.

۲- روش تحقیق

برای افزایش کارآیی کارخانه‌های فرآوری و قبل از انجام عملیات بهینه‌سازی سیستم، استانداردسازی فرآیندها و تجهیزات مورد استفاده ضروری است. برای انجام استانداردسازی، لازم است که فرآیند به خوبی شناخته شود.

روش به کار گرفته شده برای استانداردسازی فرآیند در این تحقیق، بر مبنای مشاهده وضعیت مدار، تهیه و تنظیم برگه‌های پایش، مستندسازی تصویری، مطالعه دستورالعمل، بررسی کارهای گذشته، استفاده از تجربه افراد درگیر با فرآیند و بررسی عدم تطابق‌ها بنا نهاده شد. برای افزایش کارآیی مدار سرندکنی و سنگ‌شکنی در کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه، ابتدا مدار مورد پایش قرار گرفت.



شکل ۳- مدار سرندکنی و سنگ‌شکنی مجتمع مس سرچشمه.

با توجه به پایش‌های انجام شده از مدار مشکلات اساسی شناسایی شدند و راه‌هایی برای غلبه بر آن‌ها در پیش گرفته شد. عدم استفاده از حلقه‌های کنترلی و راهبری دستی سنگ‌شکن‌ها، توزیع غیریکنواخت خوراک ورودی به سنگ‌شکن، غیراستاندارد بودن میزان تناژ ورودی به سنگ‌شکن‌ها (نیمه‌پر کار کردن) و کارکرد نامناسب سرندهای مرحله سوم، مشکلات اصلی مدار بودند که در ادامه به دلایل ایجاد این مشکلات و استانداردسازی آن‌ها پرداخته می‌شود.

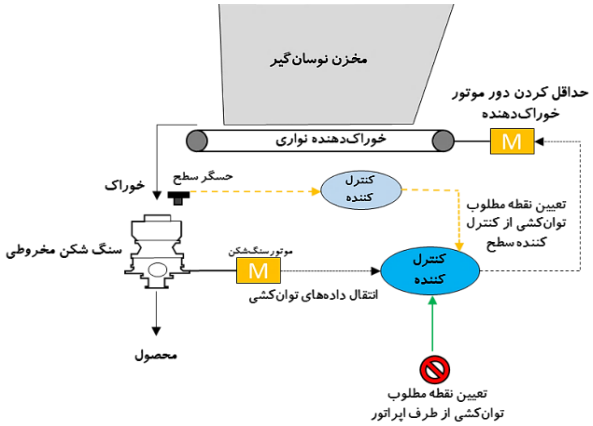
۲-۱- کنترل خودکار سنگ‌شکن‌ها

حفظ توان‌کشی اسمی و پر بودن محفظه سنگ‌شکن در بالاترین حد ممکن راه بیشینه کردن ظرفیت است که لازمه آن وجود حلقه کنترل توان‌کشی سنگ‌شکن است. با وجود اینکه این حلقه کنترلی در طرح اولیه این مدار در نظر گرفته شده بود اما طی بازرسی‌های به عمل آمده مشخص شد که داده‌های توان‌کشی هیچ یک از سنگ‌شکن‌ها در دسترس نیست. به طورکلی حلقه کنترل توان و کنترل سطح محفظه سنگ‌شکن، دو حلقه رایج برای کنترل مدار سنگ‌شکنی‌اند. بنابراین برای راه‌اندازی آن‌ها ابتدا از انتقال‌دهنده داده برای انتقال توان از واحد برق به اتاق کنترل و سطح‌سنج فراصوت برای پایش سطح سنگ معدن در محفظه سنگ‌شکن استفاده شد (شکل ۴) و سپس منطق کنترلی نوشته و راه‌اندازی شد.

شکل ۴- سطح سنج نصب شده در بالای محفظه سنگ شکنی.

در این سیستم کنترلی، توان‌کشی سنگ‌شکن با سرعت خوراک‌دهنده‌های آن به صورت یک حلقه است (شکل ۵). این منطق کنترلی بدین‌صورت است که یک مقدار مطلوب برای توان در نظر گرفته می‌شود و سرعت خوراک‌دهنده طوری تغییر می‌کند که مقدار توان‌کشی لحظه‌ای سنگ‌شکن با مقدار مطلوب برابر شود.

با افزایش توان‌کشی، سرعت خوراک‌دهنده کاهش و با کاهش آن افزایش می‌یابد. در زمانی که سنگ معدن ورودی به کارخانه نرم است، توان‌کشی سنگ‌شکن پایین است. با توجه به منطق کنترلی بر مبنای توان، سرعت خوراک‌دهنده برای رساندن عدد توان به مقدار مطلوب، افزایش داده می‌شود. برای جلوگیری از افزایش بیش از حد سطح مواد در محفظه سنگ‌شکن، ریزش مواد به اطراف و توقف سنگ‌شکن، نیاز است یک سطح‌سنج فراصوت در بالای محفظه خردایش نصب شود تا سطح مواد را پایش کند (شکل ۵).



شکل ۵ - حلقه کنترل خودکار توان و سطح سنگ‌شکن مخروطی.

در این منطق کنترلی اگر ارتفاع مواد از سطح بالا (H) بیشتر شد، دستورات بر مبنای توان‌کشی لغو و دستور کنترل سطح وارد مدار می‌شود. در این شرایط، کنترل سطح دستور کاهش نقطه مطلوب توان به ۵۰ کیلووات را صادر می‌کند و سرعت خوراک‌دهنده بر اساس منطق کنترل به ۲۵ درصد کاهش می‌یابد [۷]. بعد از راه‌اندازی حلقه کنترل توان و سطح سنگ‌شکن‌ها، حلقه کنترل توان‌کشی دارای نوسان‌های زیادی بود. برای بر طرف کردن نوسان‌ها، ابتدا مشکلات مربوط به بخش مکانیک و برق سنگ‌شکن بر طرف شد و سپس ضرایب کنترلی از طریق روش تجربی کوون و کوهن [۲۴] تعیین و اجرا شد (جدول ۲).

جدول ۲- ضرایب اعمال شده برای حلقه کنترل توان و سطح.

PID Coefficients	
Gain	۰/۵
Ti	۳۰ ثانیه
Deadband	۵ تن در ساعت
Lag time	۲ ثانیه

پس از راه‌اندازی این تجهیزات، دو مشکل اساسی برای بهره‌گیری از آن وجود داشت. مشکل اول وجود نوسانات پایدار در سیستم کنترلی بود که به دلیل خوراک‌دهی یک طرفه به سنگ‌شکن بود که سبب ایجاد نوسان در جریان‌کشی سنگ‌شکن و سرعت خوراک‌دهنده می‌شد. مشکل دوم این بود

که در حالت کنترل خودکار، در اغلب موارد سرعت خوراک‌دهنده که مقدار آن در حلقه کنترلی با توجه به توان‌کشی سنگ‌شکن مشخص و تنظیم می‌شود، به حالت اشباع (۱۰۰ درصد سرعت خوراک‌دهنده) می‌رسید. به همین دلیل، امکان تنظیم توان‌کشی سنگ‌شکن در مقدار مطلوب وجود نداشت و از حداکثر ظرفیت تجهیز استفاده نمی‌شد، بنابراین برای استفاده از کنترل خودکار سنگ‌شکن ابتدا لازم بود این مشکلات بررسی و رفع شوند.

۲-۲- توزیع غیر یکنواخت خوراک ورودی به سنگ‌شکن

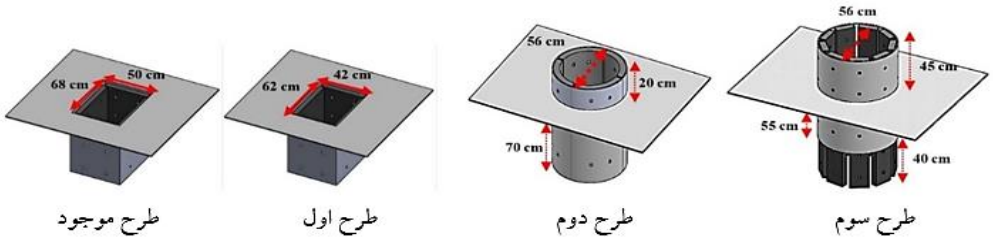
یکی از عوامل تاثیرگذار بر عملکرد سنگ‌شکن‌های مخروطی نحوه باردهی به آن‌ها است. استفاده از حداکثر کارآیی سنگ‌شکن‌ها به طور مستقیم با نحوه خوراک‌دهی به آن‌ها در ارتباط است. بر اساس پایش‌های به عمل آمده مشخص شد که خوراک‌دهی به سنگ‌شکن‌ها به صورت یک طرفه است. دلیل اصلی خوراک‌دهی یک طرفه، مجرای خوراک سنگ‌شکن بود. به همین دلیل اصلاحاتی برای فراهم کردن خوراک‌دهی یکنواخت روی مجرای خوراک انجام شد. به ترتیب با انجام سه طرح و کاهش سطح مقطع مجرای عبور مواد از ۰٫۳۴ به ۰٫۲۵ متر مربع، تغییر سطح مقطع مجرا از مکعب مستطیل به استوانه‌ای و افزایش ۵۰ سانتی‌متری ارتفاع، مجرای خوراک استوانه‌ای استاندارد، تکمیل شد. در شکل ۶، طرح‌های مختلف در جهت استانداردسازی مجرای خوراک نشان داده شده‌اند.

۲-۳- غیراستاندارد بودن میزان تناژ ورودی به سنگ‌شکن‌ها

با توجه به بازرسی‌های انجام شده مشخص شد، انسداد ۳۰ درصد ابتدای خوراک‌دهنده‌های مرحله سوم، تنظیم نبودن ارتفاع صفحه تنظیم خوراک‌دهنده و پایین بودن حداکثر سرعت خوراک‌دهنده‌های مرحله سوم، سبب کاهش ظرفیت خوراک‌دهی خوراک‌دهنده‌ها شده بود. تغییرات جهت افزایش تناژ خروجی خوراک‌دهنده‌های مرحله سوم طی سه مرحله انجام شد. در مرحله اول صفحات تنظیم طبق طراحی اولیه اصلاح شدند تا شار عبوری خوراک استاندارد شود (شکل ۷). در مرحله دوم، مخازن در تعمیرات اساسی سالیانه رفع انسداد شدند. در مرحله سوم، سرعت خوراک‌دهنده‌ها به صورت موثر با تغییر ولتاژ افزایش داده شد (متوسط ۱۸ درصد) تا تناژ مورد نظر حاصل شود.

۲-۴- عیب‌یابی و استانداردسازی سرندها

به طور کلی هدف از مدار سرندکنی و سنگ‌شکنی مجتمع مس سرچشمه تولید محصول با ابعاد ۸۰ درصد زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر است. کارکرد صحیح سرند، منجر به تولید محصول با دانه‌بندی مناسب می‌شود. در نتیجه پایش، عیب‌یابی و استانداردسازی مدار سرندکنی اهمیت زیادی دارد. ورود ذرات درشت‌تر از سرند ۱۲٫۷ میلی‌متر به محصول مدار سرندکنی و سنگ‌شکنی مشکل اصلی سرندها بود. در این راستا سرندها مورد پایش قرار گرفتند و عیب‌ها شناسایی و رفع شد. طراحی گوشواره (صفحه جلوگیری‌کننده از ورود ذرات درشت روی سرند به زیر سرند در کناره‌ها) برای سرندها، کاهش فاصله بین توری از طریق طراحی شاسی جدید برای سرند، رفع پارگی توری و شاسی پشت سرند، جلوگیری از توزیع نامتقارن خوراک سرند از جمله اقدامات انجام شده در راستای استانداردسازی سرندها بود.



شکل ۶- طرح‌های اصلاحی برای استانداردسازی مجرای خوراک.

شکل ۷- اصلاح صفحات خوراک‌دهنده‌های مرحله سوم سنگ‌شکنی طبق طراحی اولیه.

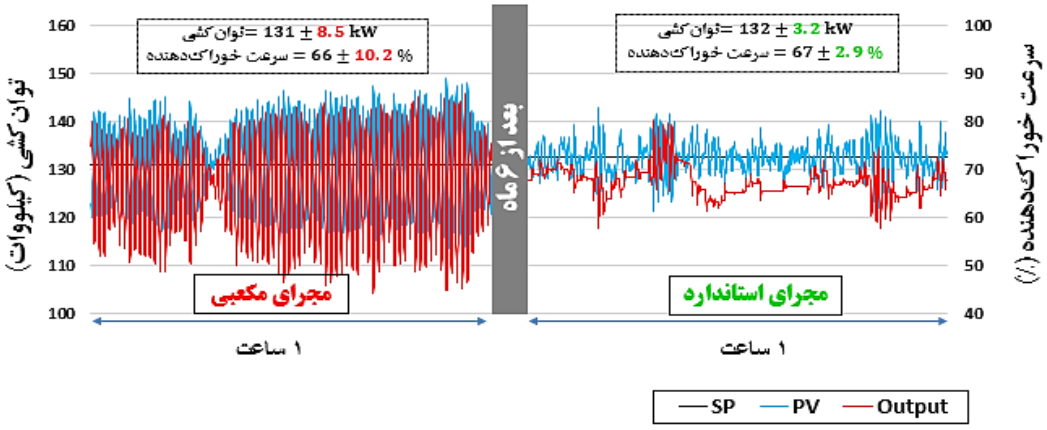
۳- ارایه یافته‌ها و تحلیل نتایج

بررسی فرآیند انجام شده در این تحقیق کاربردی، ضمن مشخص کردن مشکلات راهبری مدار و عدم انطباق‌ها، این نکته را آشکار کرد که اصلی‌ترین مرحله برای بهینه کردن راهبری مدار سنگ‌شکنی، راه‌اندازی سیستم کنترل خودکار و به کارگیری مداوم آن برای راهبری مدار است. به همین منظور، عیب‌یابی و استانداردسازی اجزا مدار برای دستیابی به حداکثر ظرفیت و اجرای حلقه‌های کنترل مدار انجام شد. پس از انتقال داده‌های توان‌کشی سنگ‌شکن‌ها، نوسان‌ها و تاثیر غیراستاندارد بودن اجزا مدار از جمله خوراک‌دهی غیریکنواخت و ظرفیت کم نوارهای خوراک‌دهنده مشخص تر شد. در این بخش ابتدا نتایج استانداردسازی اجزای مدار مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس به نتایج به کارگیری حلقه‌های کنترل توان‌کشی و کنترل سطح محفظه خردایش مدار سنگ‌شکنی سوم پرداخته می‌شود.

۳-۱- توزیع یکنواخت خوراک سنگ‌شکن‌ها

انجام اصلاحات برای خوراک‌دهی یکنواخت و نصب مجرای خوراک استوانه‌ای استاندارد (طرح سوم شکل ۶)، باعث توزیع یکنواخت بار ورودی به سنگ‌شکن شد. توزیع یکنواخت خوراک، باعث سایش یکنواخت زره ثابت شد و عمر آن را به طور متوسط ۱٫۸ برابر کرد. وضعیت سایش زره ثابت در شکل ۸ الف و ب به ترتیب برای زمانی است که بار به صورت غیریکنواخت و یکنواخت داخل سنگ‌شکن توزیع می‌شدند، نشان داده شده است. همچنین، توزیع یکنواخت باعث کاهش نوسان توان‌کشی سنگ‌شکن‌ها می‌شود. شکل ۹ نشان‌دهنده توان‌کشی سنگ‌شکن قبل و بعد از نصب مجرای خوراک استاندارد است. میزان انحراف معیار توان‌کشی پس از استفاده از مجرای استاندارد، از ۸٫۵ به ۳٫۲ کیلووات تغییر یافت. علاوه بر این، زمانی که بار به صورت غیریکنواخت وارد سنگ‌شکن می‌شد، یک طرف سنگ‌شکن پر و طرف دیگر آن تقریبا خالی می‌ماند که باعث عدم استفاده از حداکثر تناژ سنگ‌شکن و انسداد آن می‌شد. با انجام این تغییرات، امکان استفاده از کل محفظه سنگ‌شکنی و پر کار کردن آن فراهم شد.

شکل ۸- زره ثابت سنگ‌شکن مخروطی، الف) با توزیع غیریکنواخت و ب) با توزیع یکنواخت.



شکل ۹- توان‌کشی سنگ‌شکن قبل و بعد از نصب مجرای خوراک استاندارد (نمودار قرمز، آبی، و سیاه رنگ بترتیب سرعت خوراک‌دهنده، توان‌کشی لحظه‌ای و نقطه مطلوب توان‌کشی می‌باشند).

۳-۲- استانداردسازی تناژ ورودی به سنگ‌شکن‌ها

یکی از مشکلات مدار، عدم تامین ظرفیت کافی خوراک ورودی به سنگ‌شکن، حتی در ۱۰۰ درصد سرعت خوراک‌دهنده بود و به همین دلیل، امکان تنظیم توان‌کشی سنگ‌شکن در مقدار مطلوب وجود نداشت. برای حل این موضوع، در مرحله اول ابتدا صفحات تنظیم خوراک‌دهنده طبق طراحی اولیه اصلاح شدند.

با این کار، ارتفاع خوراک خروجی از خوراک‌دهنده‌ها ۱۷ سانتی‌متر افزایش یافت که منجر به افزایش تناژ خروجی از خوراک‌دهنده‌ها شد. در این مرحله به طور کلی تناژ نسبت به قبل به میزان ۲۷ درصد افزایش یافت. در مرحله دوم تغییرات، مخازن در تعمیرات اساسی سالیانه رفع انسداد شدند و به مقدار جزیی سرعت خوراک‌دهنده‌ها افزایش داده شد. رفع انسداد مخازن باعث شد که دانسیته توده مواد روی نوار خوراک‌دهنده به علت فشار مواد طبقات بالایی افزایش یابد و این مساله موجب افزایش ۳ درصدی تناژ شد. افزایش جزیی سرعت خوراک‌دهنده‌ها (به طور متوسط ۴ درصد) با تغییر ولتاژ آن‌ها باعث شد که تناژ ورودی و توان‌کشی سنگ‌شکن در این مرحله ۵ درصد افزایش یابد.

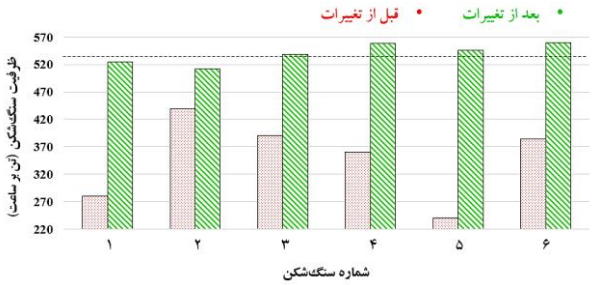
در مرحله سوم، سرعت خوراک‌دهنده‌ها به طور متوسط ۱۸ درصد با تغییر ولتاژ افزایش داده شدند تا تناژ مورد نظر حاصل شود. در این مرحله ۱۴ درصد افزایش تناژ نسبت به مرحله قبل به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود با انجام این تغییرات، تناژ هر یک از ۶ سنگ‌شکن سوم به تناژ اسمی آن‌ها (۵۳۱ تن بر ساعت؛ خط چین نشان داده در شکل ۱۰) نزدیک شد.

نکته قابل توجه این بود که استانداردسازی ظرفیت ورودی به سنگ‌شکن‌های مرحله سوم، باعث کاهش ۱۸ درصد ساعت کارکرد سنگ‌شکن‌های مرحله سوم نسبت به سال‌های قبل شد. به عبارتی تعداد سنگ‌شکن‌های آماده به کار از ۱ عدد به ۲/۵ دستگاه افزایش یافت (شکل ۱۱).

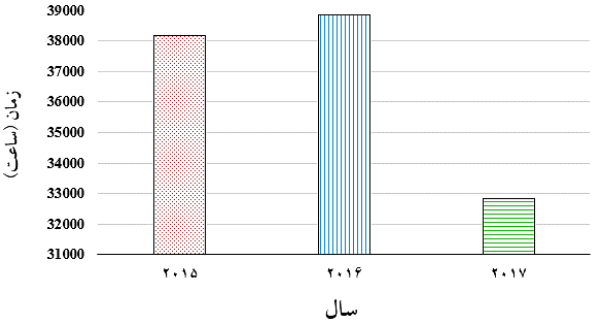
۳-۳- راه‌اندازی حلقه کنترل توان‌کشی- سطح سنگ‌شکن‌ها

پس از کاهش نوسان توان، در نتیجه استانداردسازی و افزایش ظرفیت ورودی به سنگ‌شکن‌ها، حلقه کنترل خودکار توان‌کشی و سطح برای تمام سنگ‌شکن‌ها اجرا شد. راه‌اندازی حلقه کنترل توان‌کشی باعث شد، قابلیت استفاده از حداکثر ظرفیت توان‌کشی مهیا شود.

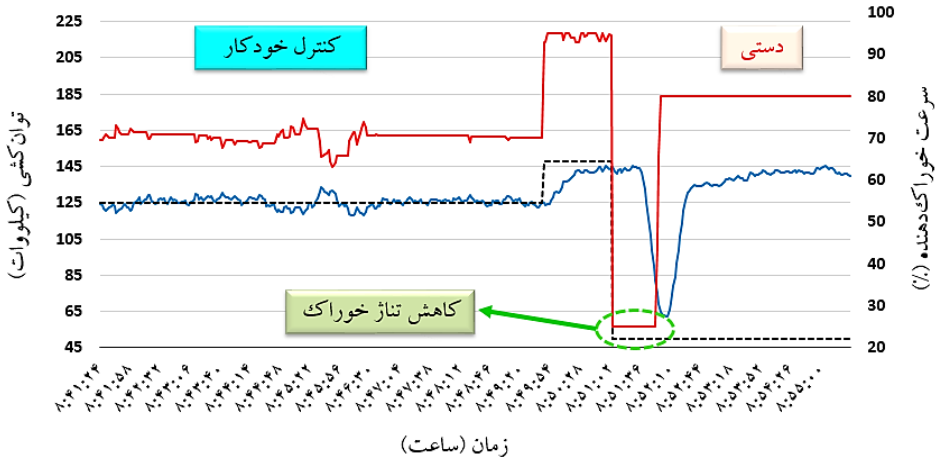
با راه‌اندازی حلقه کنترل سطح سنگ‌شکن‌ها، تعداد انسداد سنگ‌شکن‌ها از ۱۰ مرتبه در ماه به ۱ مرتبه کاهش یافت. رفع انسداد سنگ‌شکن به دلیل بالا آمدن سطح مواد از محفظه سنگ‌شکنی و ریختن مواد به اطراف نیاز به ۳ نیرو و حداقل ۴ ساعت زمان دارد. در شکل ۱۲، مثالی که بیانگر زمانی که سنگ‌شکن در حالت کنترل خودکار است و حلقه کنترل سطح، باعث جلوگیری از ریزش مواد و انسداد سنگ‌شکن شده است، آورده شده است. در این نمودار، در زمان ۸:۴۹:۳۸ مراقبت کار نقطه مطلوب توان‌کشی را ۲۰ کیلووات افزایش داده است. این افزایش توان باعث افزایش سرعت خوراک‌دهنده و تناژ مواد ورودی به سنگ‌شکن و در نتیجه سطح مواد درون محفظه خردایش می‌شود. در زمان ۸:۵۱:۲۰ حلقه کنترل سطح وارد عمل شده و نقطه مطلوب توان را به ۵۰ کیلووات کاهش داده است. با توجه به حلقه کنترل توان‌کشی، سرعت خوراک‌دهنده به ۲۵ درصد کاهش یافته تا مانع از ریزش و انسداد سنگ‌شکن شود.



شکل ۱۰- تغییرات تناژ ورودی به سنگ‌شکن‌های مرحله سوم. (خط چین نشان‌دهنده تناژ اسمی ۵۳۱ تن بر ساعت)



شکل ۱۱- ساعت کارکرد سه سال اخیر سنگ‌شکن‌ها.

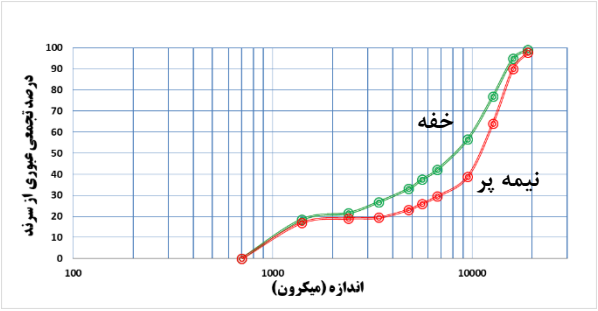


شکل ۱۲- عکس العمل سریع حلقه کنترل سطح سنگ‌شکن.
(منحنی آبی رنگ، توان‌کشی لحظه‌ای، منحنی مشکی، مقدار مطلوب توان‌کشی و منحنی قرمز نشان‌دهنده سرعت خوراک‌دهنده است).

۳-۳-۱- قابلیت پر کار کردن سنگ‌شکن‌های مرحله سوم

بکارگیری حلقه کنترل خودکار توان‌کشی باعث شد امکان استفاده از حداکثر توان‌کشی سنگ‌شکن برای خفه یا پر کار سنگ‌شکن فراهم شود. در شکل ۱۳ نمایی از سنگ‌شکن در حالت خفه و نیمه‌پر نشان داده شده است. پر بودن محفظه خردایش باعث شکست بین ذره‌ای ذرات، دانه‌بندی ریزتر و همگن‌تر محصول می‌شود. برای نشان دادن این موضوع، دانه‌بندی نوار ۱۱ که انتقال‌دهنده محصول مدار سنگ‌شکنی به آسیاکنی است، در حالت محفظه خفه و نیمه‌پر در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دانه‌بندی در حالت خفه کار کردن سنگ‌شکن، از حالت کار به صورت نیمه‌پر، ریزتر است و میزان مواد زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر (شاخص دانه‌بندی محصول سنگ‌شکن در مجتمع مس سرچشمه) در حالت خفه و نیمه‌پر، به ترتیب برابر ۷۷ و ۶۴ درصد بوده است. به عبارتی زمانی که سنگ‌شکن به حالت محفظه پر کار می‌کند، دانه‌بندی محصول زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر ۱۳ درصد افزایش یافته است (شکل ۱۴). کاهش دانه‌بندی محصول سرندکنی و سنگ‌شکنی باعث کاهش دانه‌بندی محصول خروجی از آسیا، کاهش مواد برگشتی از آسیا، افزایش عمر آسترهای آسیا، مصرف کمتر گلوله، مصرف انرژی کمتر در آسیاکنی، افزایش عمر پمپ هیدروسیکلون‌ها و افزایش بازیابی می‌شود. در نتیجه، با توجه به مواردی که توضیح داده شد کار کردن سنگ‌شکن‌ها با محفظه پر بسیار حایز اهمیت است. پر کار کردن سنگ‌شکن‌ها با محفظه پر، علاوه بر کاهش دانه‌بندی باعث ایجاد ریز ترک در محصول سنگ‌شکن می‌شود. به عبارتی این امر سبب کاهش انرژی مصرفی در آسیاها می‌شود.

شکل ۱۳- کار سنگ‌شکن مرحله سوم در حالت خفه و نیمه‌پر

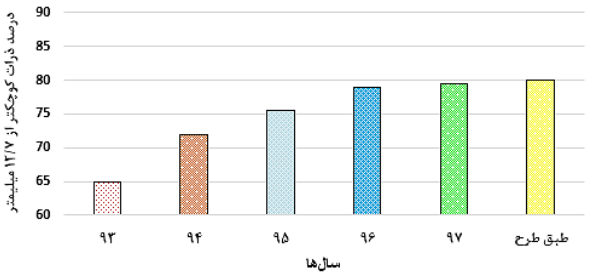


شکل ۱۴- نمودار دانه‌بندی حالت خفه و نیمه‌پر سنگ‌شکن.

۳-۴- استانداردسازی عملیات سرندکنی

بازرسی فرآیند نشان داد، ورود ذرات درشت‌تر از سرند ۱۲٫۷ میلی‌متر به محصول مدار سرندکنی و سنگ‌شکنی یکی از مشکلات اصلی بود. در این راستا سرندها مورد پایش قرار گرفتند و عیب‌ها شناسایی و رفع شدند. از جمله اقدامات برای استانداردسازی در مدار سرندکنی، طراحی گوشواره برای سرندها، کاهش فاصله بین توری از طریق طراحی شاسی جدید برای سرند، رفع پارگی توری و شاسی پشت سرند و جلوگیری

از توزیع نامتقارن خوراک سرند بود. هدف از استانداردسازی و عملکرد صحیح سرندها، تولید محصول با دانه‌بندی مطابق با طرح (۸۰ درصد زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر) بود. برای بررسی این موضوع در شکل ۱۵، میزان تولید مواد زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر در چهار سال اخیر با مدار سنگ‌شکنی و سرندکنی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، استانداردسازی سرندها باعث افزایش مواد عبوری محصول سنگ‌شکنی از ۶۵ به ۷۹٫۵ درصد زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر شد.



شکل ۱۵- میزان تولید مواد زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر در ۵ سال اخیر در مدار سنگ‌شکنی و سرندکنی.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پایش مدار سرندکنی و سنگ‌شکنی در کارخانه پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه با استفاده از روش بازرسی فرآیند انجام شد.

لازمه بیشینه کردن ظرفیت و افزایش کیفیت محصول، حفظ توان‌کشی اسمی و پر بودن محفظه سنگ‌شکن در بالاترین حد ممکن است که برای تحقق این هدف نیاز به استفاده از حلقه کنترل توان‌کشی و کنترل سطح محفظه سنگ‌شکن بود. بنابراین برای راه‌اندازی آن‌ها ابتدا داده‌های توان به اتاق کنترل انتقال داده شدند و سطح‌سنج فراصوت برای پایش سطح سنگ معدن در محفظه سنگ‌شکن استفاده شد.

با تغییر طرح مجرای خوراک سنگ‌شکن‌ها طی سه مرحله، از طرح مکعب مستطیل به مجرای خوراک استوانه‌ای استاندارد، توزیع یکنواخت خوراک ممکن شد. توزیع یکنواخت خوراک باعث افزایش عمر زره ثابت (۱٫۸ برابر) و کاهش نوسان توان‌کشی از ۸٫۵ به ۳٫۲ کیلووات شد.

با افزایش ارتفاع صفحه تنظیم خوراک‌دهنده‌ها، رفع انسداد مخازن و افزایش سرعت خوراک‌دهنده‌ها، میانگین تناژ ورودی به سنگ‌شکن‌ها از ۳۵۰ به ۵۴۰ تن در ساعت افزایش یافت و تعداد سنگ‌شکن آماده به کار از ۱ دستگاه به ۲٫۵ دستگاه افزایش یافت.

به کارگیری حلقه کنترل خودکار توان‌کشی باعث شد امکان استفاده از حداکثر توان‌کشی و خفه کار کردن سنگ‌شکن فراهم شود. زمانی که سنگ‌شکن محفظه پر کار می‌کرد، دانه‌بندی محصول زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر ۱۳ درصد افزایش یافت.

با انجام عیب‌یابی و استانداردسازی سرندها، درصد عبوری از سرند ۱۲٫۷ میلی‌متر از ۶۵ به ۷۹٫۵ درصد افزایش یافت.

تقدیر و تشکر

از مدیران و کارکنان مجتمع مس سرچشمه که همکاری‌های لازم در جهت اجرای این تحقیق عملی داشتند و همچنین به دلیل اجازه انتشار مقاله، تشکر به عمل می‌آید.

منابع

1. Flintoff. B. C and Mular. A. L; 1991; "*The Plant Audit*", A Practical Guide to Process Controls in the Minerals Industry, UBC, Brenda, P.P. 48.
2. Hamid-Reza Manouchehri; 2014; "*Changing the game in comminution practices: Vibrocone TM, a new Crusher having grinding performance*" IMPC 2014. C0927.
3. Herbst, J.A., & Potapov, A.V.; 2004; "*Making a Discrete Grain Breakage model practical for comminution equipment performance simulation*" Powder Technology, 143-144, 145-150.
4. Li, Huiqi, McDowell, Glenn, R., Lowndes & Ian.; 2014; "*Discrete element modelling of rock comminution in a cone crusher using a bonded particle model*" Geotechnique Letters, 4, 79-82.
5. Bengtsson, M,; 2009; "*Quality-driven production of aggregates in crushing plants*" Ph.D. thesis, Chalmers.
6. Major, K.; 2009; "*Factors influencing the selection and sizing of crushers*" In: Malhotra, D., et al., (Eds.), Recent Advances in Mineral Processing Plant Design. SME, Englewood, CO, USA, pp. 356360.
7. National Iranian Copper Industries Company; 1997; "*Fine Crushing and Fine Ore Storage, Operating Manual*".
8. Wills, B.A., Finch, G. A.; 2016; Wills'

"*Mineral Processing Technology*" Butterworth-Heinemann (Elsevier).

9. Legendre, D., & Zevenhoven, R.; 2014; "*Assessing the energy efficiency of a jaw crusher* " Energy, 74, 119-130.
10. Jacobson, D., Janssen, P., & Urbinatti, V.; 2010; "*Cavity level's effect on cone crusher performance and production*" 7th International Mineral Processing Seminar.
11. Quist, J.; 2012; "*Cone crusher modelling and simulation*" *Master of Science thesis*: Goteborg, Sweden, 1652–9243.
12. Lindqvist, M., Evertsson, M., Chenje, T., & Radziszewski, P.; 2006; "*Influence of particle size on wear rate in compressive crushing*" Minerals Engineering, 19, 1328-1335.
13. Lichter, J., Lim, K., Potapov, A., & Dean, K.; 2009; "*New developments in cone crusher performance optimization*" Minerals Engineering, 22, 613-617.
14. P. A. Cundall,;1979; "*A discrete numerical model for granular assemblies*" Geotechnique, vol. 29, pp. 47-65, 1979.
15. B. K. Mishra and R. K. Rajamani,;1992; "*The discrete element method for the simulation of ball mills*" Applied Mathematical Modelling, vol. 16, no. 11, pp. 598-604, 1992.
16. King, R.P.; (2001); "*Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*", Butterworth – Heinemann.
17. Delaney, G.W., Morrison, R.D., Sinnott, R.D., Cummins, S., & Cleary, P.W.; 2015; "*DEM modelling of non-spherical particle breakage and flow in an industrial scale cone crusher* ". Minerals Engineering , 74, 112-122.
18. Quist, J., & Evertsson, C.; 2011; "*Application of discrete element method for simulating feeding conditions and size reduction in cone crushers* ". Brisbane, QLD, Australia: XXV International Mineral Processing Congress (IMPC), 3337-3347.
19. Cunha, E.R., Carvalho, R.M., & Tavares, L.M.; 2010; "*Simulation of solids flow and energy transfer in a vertical shaft impact crusher using DEM* ". Minerals Engineering, 43-44, 85-90.
20. P.W. Cleary; M.D. Sinnott; R.D. Morrison; S. Cummins.;2017; "*Analysis of cone crusher performance with changes in material properties and operating conditions using DEM*". Minerals Engineering, Pages: 49-70, Vol: 100.
21. Erikson, M.T.; 2014; "*Innovations in comminution equipment: high pressure grinding rolls, semi-autogenous grinding, ball mills, and regrind mills*". In: Anderson, C.G., et al., (Eds.), Mineral Processing and Extractive Metallurgy: 100 Years of Innovation. SME, Englewood, CO, USA, pp. 65-76.
22. Kelsey, C., Kelly, J.; 2014; "*Super-fine crushing to ultra-fine size, the IMP" super-fine crusher*". 27th International Mineral Processing Cong., (IMPC), Ch 9. Santiago, Chile, pp. 239–252.
23. D Muller*, P.G.R de Villiers**, G Humphries. "*A Holistic Approach to Control and Optimisation of an Industrial Crushing Circuit*". 13th Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing Cape Town, South Africa, August 2-4, 2010.
24. Joseph, E. A., Olaiya O. O.; 2018; "*Cohen-Coon PID Tuning Method: A Better Option to Ziegler Nichols-Pid Tuning Method*", Computer Engineering and Intelligent Systems, Vol.9, No.5.