

## پایش وضعیت هیدروسیکلون‌ها در کارخانه مس سرچشمه بر مبنای تحلیل امواج ارتعاشی آنها

شهاب رومیانی<sup>۱</sup>، مصطفی مالکی مقدم<sup>۲\*</sup>، هادی حلاوتی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان

۳- کارشناسی ارشد، مشاور امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه، رفسنجان

(دریافت ۱۳۹۹/۰۵/۲۵، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۲۱)

### چکیده

هیدروسیکلون یکی از مهم‌ترین تجهیزات مورد استفاده برای طبقه‌بندی مواد در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی است. عملکرد نامطلوب هیدروسیکلون و درشت شدن ذرات در سرریز آن باعث تاثیر بر فرآیندهای پایین دست می‌شود. این پژوهش، با هدف ارایه راه‌حلی برای تشخیص و جلوگیری به موقع از این اتفاق، با استفاده از تحلیل امواج ارتعاشی، انجام گرفت. نتایج اولیه آنالیز سیگنال ارتعاشات پس از ۲۰ بار اندازه‌گیری با استفاده از ارتعاش‌سنج نشان داد متوسط نرخ ارتعاشات از میزان ۶ دسی‌بل در زمان عادی به ۱۱ دسی‌بل در زمان گرفتگی افزایش می‌یابد و نوسان بیش از ۲ برابر می‌شود. جهت یکسان‌سازی رفتار ارتعاشی هیدروسیکلون‌ها در کارخانه تغلیظ ۲ مجتمع مس سرچشمه، یک لایه لاستیکی زیر شاسی هیدروسیکلون نصب گردید و سفت کردن پیچ‌ها با یک گشتاور مساوی انجام شد. برای کاهش هزینه و افزایش دقت کار تشخیص درشت شدن ذرات سرریز، حسگری بر مبنای پدیده پیزوالکتریک ساخته و با طراحی مدار الکترونیکی، آژیری برای هیدروسیکلون نصب شد. تحلیل داده‌های حسگر پیزوالکتریک نشان داد متوسط دامنه ارتعاشات از میزان ۱۳ دسی‌بل در زمان عادی، به ۲۳ دسی‌بل در زمان گرفتگی افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از دانه‌بندی نشان داد به دلیل منتقل شدن بدون طبقه‌بندی مواد به سرریز، میزان  $K_{80}$  (اندازه‌ای که ۸۰٪ ذرات از آن کوچک‌تراند) از ۱۱۹ میکرون در شرایط عادی به ۷۲۵ میکرون در زمان گرفتگی افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده این مطلب است که استفاده از این حسگرها تا چه میزان ممکن است به افزایش کارآیی مدارهای فرآوری کمک کند.

### کلمات کلیدی

هیدروسیکلون، رفتار ارتعاشی، حسگر پیزوالکتریک، مجتمع مس سرچشمه.

## ۱- مقدمه

هیدروسیکلون (ته‌ریز) خارج می‌شوند [۴]. در عملیات معمول هیدروسیکلون، یک مغزه هوای عمودی در داخل آن ایجاد می‌شود و شکل خروجی جریان در ته ریز به صورت چتری است (حالت اول). از بین رفتن این مغزه هوا به عملکرد نامطلوب آن منجر می‌شود. ذرات درشت با نسبت بیشتری به سرریز منتقل می‌شوند و با افزایش دانسیته جریان ته ریز، شکل آن به صورت طنابی تغییر می‌یابد (حالت دوم). حالت عملیاتی نامطلوب دیگری که ممکن است رخ دهد، انسداد ته ریز است که اغلب به دلیل گیر کردن جسم خارجی در ته ریز ایجاد می‌شود (حالت سوم). این شرایط باعث می‌شود که مواد از مسیر معمول تخلیه نشود، بنابراین جدایشی رخ نمی‌دهد و تمام مواد خوراک مستقیماً به سرریز منتقل می‌شوند [۵]. شکل ۲ این سه حالت عملیاتی را نشان می‌دهد.

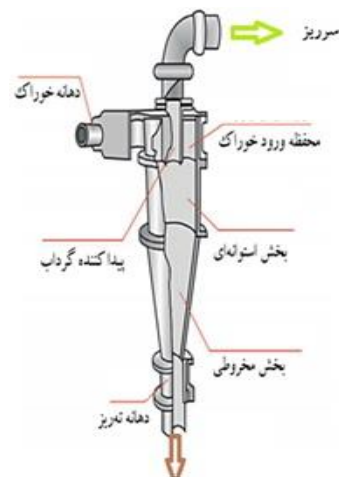


شکل ۲: حالت‌های هیدروسیکلون، نشان‌دهنده عملکرد طبیعی ("چتری") و عملکرد غیرعادی ("طنابی" و "مسدود") [۵]

در کارخانه‌های فرآوری برای بهره‌برداری از نیروی جاذبه در انتقال محصول، خوشه‌های هیدروسیکلون اغلب در نقاط مرتفع قرار دارند. این فاصله زیاد، همراه با نبود سیستم‌های ابزار دقیقی پایش در اطراف مدار هیدروسیکلون، ممکن است شناسایی شرایط کار نامطلوب را دشوار کند. این شناسایی به ویژه در مواردی که فقط در تعداد کمی هیدروسیکلون در یک خوشه شرایط نامطلوب رخ می‌دهد، سخت می‌شود [۵]. بنابراین روش‌های مختلفی برای بررسی برخط حالت‌های کاری هیدروسیکلون و رفع مشکل عملکرد نامطلوب، پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته است.

به عنوان مثال، ویلیامز<sup>۱</sup> و همکاران استفاده از توموگرافی مقاومت الکتریکی<sup>۲</sup> (ERT) در هیدروسیکلون صنعتی را از طریق نصب الکترودها روی دیواره هیدروسیکلون، بررسی کرده‌اند [۶]. از طریق این روش، قطر مغزه هوا و محل آن، پروفیل‌های دانسیته پالپ و شرایط عملیاتی قابل استنباط بود.

هیدروسیکلون به عنوان یک وسیله طبقه‌بندی‌کننده ذرات، بیش از ۵۰ سال است که در صنعت فرآوری مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از هیدروسیکلون برای طبقه‌بندی ذرات باعث می‌شود زمان رسیدن به حالت پایدار در صورت ایجاد تغییر در مدار، کوتاه شود که این امر خیلی مفید است، چون از اکسید شدن موادی که برای شناورسازی فرستاده می‌شوند، جلوگیری می‌کند [۱]. در این تجهیز جهت افزایش سرعت طبقه‌بندی و ته‌نشینی و اعمال نیروی موثر روی ذرات، علاوه بر نیروی گرانش، از نیروی گریز از مرکز استفاده می‌شود و علی‌رغم کاربرد وسیع، این دستگاه هیچ قطعه متحرکی ندارد و دارای عملکرد ساده‌ای است [۲]. نمایی از این تجهیز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: قسمت‌های اصلی تشکیل‌دهنده هیدروسیکلون [۳]

تجربیات استفاده از این دستگاه نشان داده است که در جداسازی ذرات با ابعاد ریز بسیار موثر عمل می‌کند [۳]. پالپ حاوی ذرات در اندازه‌های متفاوت به طور مماسی وارد آن شده و طی حرکت دورانی پالپ و بر اساس نیروهای موثر (وزن، گریز از مرکز و مقاومت سیال) ذرات به دو دسته دانه‌درشت و دانه‌ریز تقسیم می‌شوند. مواد دانه‌ریز بیشتر تحت تاثیر نیروی مقاومت سیال قرار گرفته و به سمت مرکز هیدروسیکلون (منطقه کم فشار) حرکت کرده و از طریق لوله بالای هیدروسیکلون به خارج منتقل می‌شوند (سرریز). ذرات درشت سنگین بر اثر نیروی گریز از مرکز به سمت دیواره هیدروسیکلون هدایت شده و بر اثر نیروی وزن از طریق دهانه تعبیه شده در پایین

خازنی و حسگر صوتی در ته‌ریز مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شد که حسگر وزن و صدا بهترین عملکرد را در مقیاس آزمایشگاهی دارد [۱۲]. به طور مشابه، شرکت مینتک<sup>۱۱</sup> یک سنسور تجاری بر پایه لیزر ارایه کرده است که با استفاده از فاصله از نقطه نصب تا نقطه ته ریز، زاویه جریان ته ریز را مشخص می‌کند [۱۳].

روش سنجش غیرتماسی دیگری که برای بهره‌برداری از اختلاف جریان ته ریز در حالت‌های مختلف عملیاتی پیشنهاد شده است، تجزیه و تحلیل تصویر است. کارهای اولیه توسط پیترسن<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۵] و دونتر<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۶] بر اساس استفاده از دوربین فیلمبرداری و روشنایی مناسب، برای تعیین زاویه پاشش جریان ته ریز در هر دو هیدروسیکلون آزمایشگاهی و صنعتی انجام شد. فریم‌های ویدیویی از طریق تکنیک‌های فیلتر کردن و آستانه‌گذاری برای جداسازی لبه‌های جریان ته‌ریز برای محاسبه زاویه آن استخراج [۱۷] و در سال‌های بعد این روش توسعه داده شد [۱۹، ۱۸].

در سال‌های اخیر، شبکه‌های عصبی پیچشی<sup>۱۳</sup> (CNN) به عنوان پیشرفته‌ترین روش در تشخیص الگوی تصویر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. گیگلیا<sup>۱۴</sup> و آلدیچ<sup>۱۵</sup> در مطالعه‌ای توانایی قوی شبکه‌های عصبی پیچشی عمیق را برای استخراج ویژگی‌های معنی‌دار از تصاویر ته‌ریز هیدروسیکلون بدون نیاز به پیش‌پردازش قابل توجه تصویر نشان دادند. شبکه‌های عصبی پیچشی عمیق به پیشرفت‌های چشمگیری در وظایف پایش از طریق بنیادی رایانه منجر شده است. علاوه بر این، استفاده از یادگیری انتقال<sup>۱۶</sup> امکان استفاده از این عملکرد بهبود یافته را در مجموعه داده‌های کوچکتر فراهم می‌کند. فریم‌های ویدیویی از ته‌ریز هیدروسیکلون آزمایشگاهی برای تولید یک طبقه‌بندی سه حالت (چتری / طناب‌شدگی / انسداد)، از طریق یادگیری انتقال با استفاده از ویژگی شبکه عصبی پیچشی پیش‌ساخته، مورد استفاده قرار گرفت. مزیت عمده این روش نسبت به روش‌های قبلی این بود که به ویژگی‌های فرآیند و تغییر شرایط عملیات حین کار حساسیت بالایی دارد [۵].

#### ۱-۱- مدار آسیاکنی کارخانه پرعیار کنی ۲ مجتمع مس سرچشمه

مدار آسیاکنی کارخانه پرعیار کنی ۲ مجتمع مس سرچشمه دارای دو فاز (یک و دو) است که در هر فاز برای طبقه‌بندی از هیدروسیکلون استفاده می‌شود (شکل ۳). مواد بعد از آسیای نیمه‌خودشکن بر روی سردن لرزان قرار گرفته،

در حالی که ERT و روش‌های توموگرافی امپدانس الکتریکی اطلاعات دقیقی در مورد دینامیک داخلی هیدروسیکلون‌ها ارایه می‌دهند، پیچیدگی آرایه‌های حسگر آن مانع اجرای گسترده و صنعتی شدن آن می‌شود [۷].

از نظر تجاری شدن و استفاده صنعتی، به نظر می‌رسد سنسورهای صوتی پیشرفته‌ترین در حال حاضرند [۸]. از سیستم‌های صوتی مستقر در بازار، محصولات شرکت سیدرا<sup>۱۳</sup> است. این شرکت دو ابزار کنترل دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون را معرفی کرده است. ابزار اول، سیستمی تحت عنوان "اُم اس" است که این ابزار کنترلی، بدون تماس با پالپ عبوری بر روی لوله سرریز هیدروسیکلون نصب می‌شود و از طریق آنالیز امواج صوتی، ذرات بزرگتر از ۶ میلی‌متر را تشخیص می‌دهد. از جمله مزایای این حسگر، عدم تماس مستقیم با پالپ است که مشکل سایش حسگر را به دنبال ندارد و عدم دقت کافی، عیب این محصول است. ابزار دوم، سیستم "پی اس تی"<sup>۱۴</sup> است که به تازگی توسط همین شرکت معرفی شده است. حسگر این سیستم، به طور مستقیم با پالپ عبوری از لوله سرریز هیدروسیکلون در تماس است و اندازه ابعاد ذرات عبوری از سرریز هیدروسیکلون را تا اندازه ۱۵۰ میکرومتر نشان می‌دهد [۹، ۱۰]. از معایب این سیستم، تماس مستقیم با پالپ عبوری است که سرعت سایش حسگر را زیاد می‌کند. علاوه بر این، این سنسورهای صوتی راحت‌تر از روش‌های توموگرافی الکتریکی که قبلاً شرح داده شده، در سیستم‌های موجود نصب می‌شوند [۵]. شرکت اف ال اسمیت<sup>۱۵</sup> سیستمی را با نام "سیکلون هوشمند"<sup>۱۶</sup> معرفی کرده است. این سیستم دارای حسگری است که در ته‌ریز هیدروسیکلون نصب می‌شود و در صورت خارج شدن از حالت عادی آن، یعنی تغییر شکل به ته‌ریز طنابی یا چتری هشدار می‌دهد [۱۱]. از مزایای این سیستم، انتقال داده‌ها به صورت بی‌سیم<sup>۱۷</sup> است، اما آنالیزی از دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون ارایه نمی‌دهد.

روش‌های مورد بحث تاکنون بر استخراج اطلاعات از حسگرهای نصب شده روی هیدروسیکلون متمرکز بوده است. با این حال همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نحوه تخلیه جریان ته ریز ممکن است به عنوان یک نشانه خارجی از حالت کار هیدروسیکلون باشد. نسی<sup>۱۸</sup> و همکاران پایش عملکرد هیدروسیکلون را در محیط آزمایشگاهی، با روش‌های مختلفی مانند استفاده از پرتو لیزر و دوربین بر روی جریان پالپ خروجی از ته‌ریز، اندازه‌گیری وزن هیدروسیکلون، نصب حسگر

تهریز اتفاق می‌افتد. از ابزار پایش کارکرد هیدروسیکلون‌ها، حسگرهای کنترل دانه‌بندی سرریز است که درشت شدن محصول را پایش می‌کنند، بنابراین با توجه به انحصاری بودن این تجهیزات و لزوم بومی‌سازی آن، در این تحقیق، ساخت ابزار پایشی برای کنترل دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون‌ها، با استفاده از آنالیز ارتعاشات، مد نظر قرار گرفت. لازم به ذکر است علیرغم استفاده وسیع از هیدروسیکلون‌ها در کارخانه‌های فرآوری مواد کشور، این تجهیزات به دلیل هزینه‌های زیاد و شرایط تحریم مورد استفاده قرار نگرفته‌اند.

جدول ۱: مشخصات هندسی هیدروسیکلون‌های کارخانه پریار کنی ۲ مجتمع مس سرچشمه

ارتفاع (cm)	قطر ته‌ریز (cm)	قطر پیداکننده گرداب (cm)	قطر هیدروسیکلون (cm)
۲۷۴٫۲	۱۲٫۷	۲۰٫۳	۶۶٫۰۴

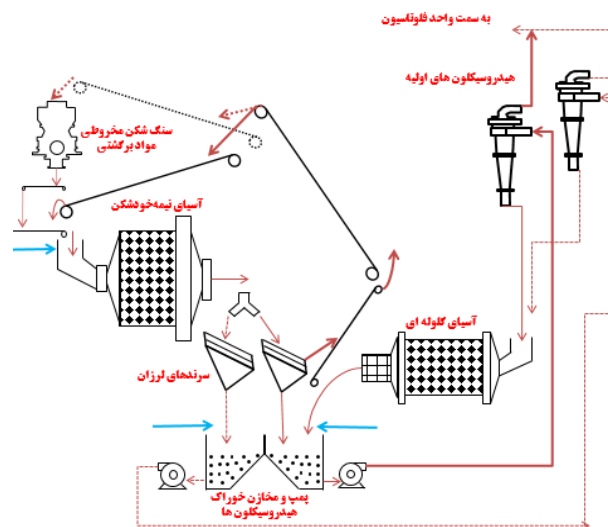
جدول ۲: مشخصات عملیاتی هیدروسیکلون‌های کارخانه پریار کنی ۲ مجتمع مس سرچشمه

جریان هیدروسیکلون	درصد جامد	دانه‌بندی (درصد عبوری از ۷۴ میکرون)
خوراک	۵۴	۳۱٫۴
سرریز	۲۸	۷۶
ته‌ریز	۷۰	۱۳٫۳

مواد روی سرند به سنگ‌شکن برگشتی منتقل و مواد زیر سرند به هیدروسیکلون‌های اولیه پمپ می‌شود. هر فاز دو خوشه هیدروسیکلون دارد که یکی در حال کار و دیگری آماده به کار است. تعداد هیدروسیکلون‌ها در هر خوشه ۱۵ عدد است که تعداد در حال کار آن، در یک حلقه کنترلی با فشار قرار دارد. همچنین دانسیته خوراک به وسیله دانسیته‌سنج هسته‌ای اندازه‌گیری می‌شود و میزان آب اضافه شده به خوراک هیدروسیکلون‌ها با این دانسیته در حلقه کنترلی قرار دارد.

سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه مجتمع مس سرچشمه، خوراک سلول‌های پریارکنی اولیه فلوتاسیون است. مشخصات هندسی و عملیاتی هیدروسیکلون‌های فاز ۱ و ۲ مجتمع مس سرچشمه در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

یکی از مشکلات بزرگ در کارخانه تغلیظ مجتمع مس سرچشمه، درشت شدن ذرات سرریز هیدروسیکلون‌ها است که نتیجه آن عدم شناورسازی ذرات در فلوتاسیون، ایجاد فضای مرده در سلول‌های پریارکنی اولیه، برهم خوردن الگوی جریان، کاهش عیار و بازیابی و افزایش توقفات به واسطه خرابی تجهیزات مانند روتور و استاتور است. عملکرد نامطلوب هیدروسیکلون ناشی از تنظیم نبودن پارامترهای عملیاتی (فشار و دانسیته)، سایش اجزای تشکیل‌دهنده (ایجادکننده گرداب<sup>۱۷</sup> و ته‌ریز) و گرفتگی ته‌ریز هیدروسیکلون است. این گرفتگی به دلایلی مانند شکستگی سرندهای جلوی آسیابها، پمپ شدن مواد درشت و گلوله‌های بیرون آمده از آسیابها به سمت هیدروسیکلون‌ها، بالا بودن دانسیته خوراک و تجمع ذرات در



شکل ۳: مدار آسیابکنی اولیه فاز ۱، کارخانه پریار کنی ۲ مجتمع مس سرچشمه (فاز ۲ مشابه فاز ۱ است)

## ۲- روش انجام تحقیق

در این پژوهش، ساخت حسگری برای تشخیص درشت شدن ذرات هیدروسیکلون مد نظر قرار گرفت که در ابتدا نیاز به روشی برای داده‌برداری و تحلیل داده‌ها داشت. با توجه به بالا بودن حجم داده‌برداری‌ها و مشخص نبودن زمان گرفتگی ته‌ریز هیدروسیکلون، گرفتگی مصنوعی هیدروسیکلون در بازه‌های نمونه‌برداری اجرا شد. در این روش، جهت ایجاد شرایط واقعی گرفتگی، با قرار دادن صفحه‌ای در ته‌ریز یکی از هیدروسیکلون‌ها، گرفتگی مصنوعی ایجاد می‌شد و تمامی خوراک ورودی (شامل ذرات درشت) به سرریز انتقال می‌یافت. داده‌برداری‌ها در شرایط مختلف عملیاتی هیدروسیکلون انجام می‌شد. این شرایط شامل حالت عادی کاری هیدروسیکلون، حالت بحرانی ناشی از گرفتگی ته‌ریز و ورود ذرات درشت به سرریز هیدروسیکلون و شرایط بدون بار هیدروسیکلون است.

## ۱-۲- تجهیزات داده‌برداری

در این بخش، وسایل و ابزاری که برای انجام نمونه‌برداری مورد استفاده قرار گرفت، شرح داده می‌شوند. با توجه به اهمیت مبنای کار حسگر و نوع سیگنال مورد پردازش، انتخاب نوع آن بر مبنای شرایط و اختلال‌های امواج مکانیکی در اطراف هیدروسیکلون‌ها، اهمیت زیادی داشت. به دلیل کم‌هزینه بودن و عملیاتی بودن داده‌برداری از سیگنال ارتعاشات، نمونه‌برداری‌ها با اندازه‌گیری دامنه سیگنال ارتعاشی انجام گرفت. برای این کار ارتعاشات در حالت‌های مختلف عملکرد هیدروسیکلون اندازه‌گیری شد تا محوری که در آن بیشترین پاسخ وجود دارد، مشخص شود و به عنوان مینا برای کار حسگر استفاده گردد. محورهایی که مورد بررسی قرار گرفت، محورهای اصلی یعنی X و Y بود. از یک ارتعاش‌سنج مدل Std3300 Technekon با دقت ۹۶ کیلوبیت نمونه در ثانیه جهت نمونه‌برداری اولیه از محورهای تعیین شده هیدروسیکلون‌ها استفاده شد (شکل ۴)، بنابراین از جهات اصلی لوله در هر سه شرایط عادی، گرفتگی (ورود ذرات درشت به سرریز) و حالت سیکلون بدون بار، داده‌برداری شد. پس از انتقال داده‌ها به رایانه، نتایج حاصل به صورت مجموعه داده‌هایی در نرم‌افزار صفحه گسترده اکسل مورد بررسی قرار گرفت و حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه گردید تا اختلاف دامنه سیگنال ارتعاش در حالت کارکرد عادی (Background noise) با حالت گرفتگی مشخص شود. در شکل ۵ نمایی از داده‌های انتقال یافته در نرم‌افزار صفحه

گسترده اکسل نشان داده شده است.

پس از مشخص شدن محور با بیشترین تغییرات و اثبات اینکه تحلیل امواج ارتعاشی راهی مناسب برای تشخیص شرایط بحرانی (درشت شدگی سرریز هیدروسیکلون) است، استفاده از حسگرهای با نرخ نمونه‌برداری پایین‌تر و عملیاتی‌تر مد نظر قرار گرفت، بنابراین از یک دستگاه ارتعاش‌سنج تک محوره با دقت ۲۲ کیلوبیت نمونه در ثانیه برای نمونه‌برداری از هیدروسیکلون در شرایط کارکرد عادی و کارکرد در زمان گرفتگی استفاده و از تغییرات ارتعاش لوله در محور با بیشترین نوسان با ثبت میزان فرکانس و دامنه سیگنال ارتعاش، اندازه‌گیری انجام شد. با توجه به اینکه ابزاری برای ضبط داده‌های این حسگر و تحلیل آن‌ها وجود نداشت، از برنامه‌ای با عنوان vslm تحت نرم‌افزار متلب<sup>۱۸</sup> استفاده شد تا داده‌های ارتعاشی ذخیره و نمودارهای سیگنال ارتعاش در حالات مختلف (عادی و بحرانی)



(ب)



(الف)

شکل ۴: الف) دستگاه ارتعاش‌سنج مدل Techneko، ب) داده‌برداری از لوله سرریز هیدروسیکلون

Comment:	#	t:s	Y:mm/s	#	t:s	Y:mm/s
Shop:	1	3/2	-3/31604	65488	28/78086	-1/02389
Machine:	2	3/200391	-3/10934	65489	28/78125	-1/46048
Point:	3	3/200781	-2/90101	65490	28/78164	-1/91842
Point code:	4	3/201172	-2/6944	65491	28/78203	-2/39194
Unit:	5	3/201563	-2/4739	65492	28/78242	-2/89636
Acquisition date/time:	6	3/201953	-2/23454	65493	28/78281	-3/43865
Signal type:	7	3/202344	-1/98438	65494	28/78321	-4/00999
High (Hz):	8	3/202734	-1/73416	65495	28/78359	-4/58237
Flow (Hz):	9	3/203125	-1/48605	65496	28/78398	-5/13892
Samples:	10	3/203516	-1/2225	65497	28/78438	-5/67864
Acquisition duration (s):	11	3/203906	-0/93317	65498	28/78477	-6/19334
RMS:	12	3/204297	-0/62999	65499	28/78516	-6/67791
Pk-Pk:	13	3/204688	-0/32417	65500	28/78555	-7/12686
Peak:	14	3/205078	-0/01161	65501	28/78594	-7/53126
Kurtosis:	15	3/205469	0/322125	65502	28/78633	-7/88853
Skewness:	16	3/205859	0/675467	65503	28/78672	-8/19888
Rest:	17	3/20625	1/026291	65504	28/78711	-8/47779
	18	3/206641	1/366418	65505	28/7875	-8/75449
	19	3/207031	1/708151	65506	28/78789	-9/03512
	20	3/207422	2/061544	65507	28/78828	-9/30177

شکل ۵: نمایی از داده‌های منتقل شده به نرم‌افزار صفحه گسترده اکسل برای مقایسه داده‌های ارتعاش در جهات مختلف

## ۲-۲- ساخت میراگر برای استانداردسازی نرخ ارتعاشات

داده برداری از هیدروسیکلون‌های مختلف در یک خوشه نشان داد که با توجه به شرایط و زمان نصب هر کدام، میزان نوسانات دامنه سیگنال ارتعاش هر سیکلون با سیکلون دیگر متفاوت است که نیاز به استانداردسازی میزان نوسانات سیگنال ارتعاش سیکلون‌ها بود. برای یکسان‌سازی نرخ نوسانات دامنه سیگنال ارتعاشات برای هیدروسیکلون‌های مختلف، میراگرهای ارتعاشی از جنس لاستیک، در محل اتصال بین هیدروسیکلون‌ها و سازه اصلی نصب گردید و علاوه بر آن، تنظیم گشتاور سفت کردن کلیه پیچ‌های پایه هیدروسیکلون، به یک میزان مشخص، در دستور کار قرار گرفت (شکل ۷).

## ۲-۳- ساخت حسگر اندازه‌گیری ارتعاشات با استفاده از پدیده اثر فشاربرقی (پدیده پیزوالکتریک)<sup>(۸)</sup>

میزان جابه‌جایی و ارتعاش در نقطه بین سازه و سیکلون از یک طرف و نصب میراگر ارتعاشی از طرف دیگر، مقدمه ایده‌ای شد که به جای استفاده از سنسور ارتعاشی، از یک سنسور ابتکاری که به صورت دستی با هسته پیزوالکتریک ساخته می‌شد، استفاده گردد.

یکی از ویژگی‌های برخی سرامیک‌ها، پدیده پیزوالکتریک یا اثر فشار برقی است که با اعمال نیروی خارجی، این سرامیک‌ها تحریک می‌شوند و تولید میدان الکتریکی می‌کنند. وارونه کردن اثر نیرو (مثلا از کششی به فشاری) جهت میدان را معکوس می‌کند. اثر پیزوالکتریک در واقع توانایی برخی مواد برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی است. از مواد پیزوالکتریک در مبدل‌ها و وسایلی که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی



(ب)



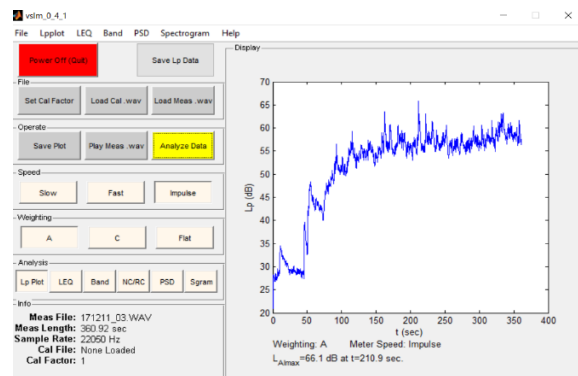
(الف)

شکل ۷: الف) میراگر ارتعاشی، ب) محل نصب میراگرهای ارتعاشی بین هیدروسیکلون و سازه اصلی

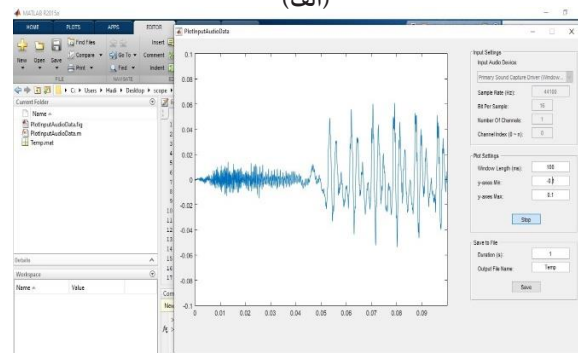
با هم مقایسه شود. در شکل ۶- الف نمایی از نحوه ثبت داده‌ها در این نرم‌افزار نشان داده شده است. در این نرم‌افزار، شدت دامنه و فرکانس داده‌ها بر حسب زمان به دست می‌آید. علاوه بر این، توانایی اعمال فیلتر برای سیگنال‌های ضربه‌ای یا پیوسته در این نرم‌افزار لحاظ شده است. جهت ثبت دقیق‌تر داده‌ها و اعمال همه جانبه تحلیل در داده‌ها نرم‌افزار دیگری با عنوان SCOP نوشته شد و مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۶- ب).

دلیل استفاده از ارتعاش‌سنج تک محوره این بود که برای ساخت حسگر تشخیص گرفتگی و عملیاتی شدن آن، با توجه به تعداد زیاد هیدروسیکلون‌ها در صنعت، نیاز به حسگری ارزان قیمت است. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین نکات طراحی حسگرهای صنعتی، راحتی نصب و دسترسی مناسب بود، برای به دست آوردن بهینه‌ترین نقطه نصب حسگر روی هیدروسیکلون و اینکه در هنگام تعمیر و نگهداری مشکل‌ساز نشود، داده برداری از نقاط مختلف سیکلون انجام شد.

بررسی‌ها نشان داد محل اتصال بین هیدروسیکلون و سازه اصلی، به دلیل دسترسی آسان‌تر، نقطه مناسبی برای داده برداری است.



(الف)



(ب)

شکل ۶: نمایی از نحوه ثبت داده‌ها در الف) نرم‌افزار vslm، ب) نرم‌افزار scop

شدن شیر کنترلی شاخه‌های اطراف، تاثیری نمی‌پذیرد و در جهت محور  $Y$  هیدروسیکلون بیشترین تغییر دامنه رخ می‌دهد. از سوی دیگر داده‌های به دست آمده از سیگنال ارتعاشات بین حالتی که هیدروسیکلون عادی کار می‌کند و حالتی که ذرات عبوری از سرریز درشت می‌گردد (ایجاد گرفتگی)، کاملاً متفاوت و قابل اندازه‌گیری است. به عنوان مثال در شکل ۹، آنالیز سیگنال ارتعاشات هیدروسیکلون با حسگر ارتعاش‌سنج در جهت محور  $Y$ ، در شرایط مختلف کاری در محیط متلب نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در حالتی که هیدروسیکلون عملکرد عادی خود را دارد بیشینه دامنه سیگنال دریافتی به وسیله ارتعاش‌سنج کمتر از ۵ دسی‌بل است، در حالی که در شرایط بحرانی حداکثر دامنه سیگنال دریافتی تا بیش از ۱۲ دسی‌بل می‌رسد و این یعنی میزان دامنه سیگنال ارتعاشات حداقل ۲ برابر شده است. زمانی که هیدروسیکلون بدون بار است، شدت دامنه سیگنال ارتعاشی نزدیک صفر است و به این معنی است که عوامل اخلاص‌گر محیط، روی دامنه سیگنال ارتعاشات تاثیری نخواهد گذاشت. برای تحلیل دقیق‌تر

تبدیل می‌کنند یا برعکس، استفاده می‌شود. این پدیده در تک بلورها و سرامیک‌ها دیده می‌شود [۲۰].

برای بهره‌گرفتن از سنسور ارتعاشات و عملیاتی شدن آن در صنعت نیاز به کاهش هزینه‌ها و بالا بردن دقت تشخیص است. برای دستیابی به این مهم حسگری بر مبنای استفاده از پدیده فشار برقی (پدیده پیزوالکتریک) طراحی و ساخته شد. این حسگر درون لایه‌ای از لاستیک (میراگر ارتعاشی) و در زیر پایه‌های هیدروسیکلون و محل تماس با سازه اصلی قرار داده شد.

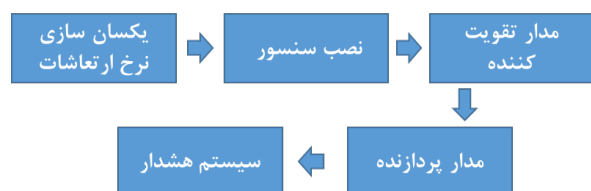
یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سنسور طراحی شده توجه به بحث تعمیر و نگهداری هیدروسیکلون‌ها است چرا که این سنسور در زمان تعمیر و نگهداری در اولین مرحله کاملاً از هیدروسیکلون جدا می‌گردد و در مرحله نهایی نصب مجدد هیدروسیکلون بدون هیچگونه آسیبی به آن اتصال می‌یابد.

یکی از جنبه‌های قابل توجه در سنسور طراحی شده نسبت به سنسورهای اشاره شده در مقالات، قیمت تولید آن است که به دلیل استفاده این سنسور در تک تک هیدروسیکلون‌ها از مزیت‌های رقابتی آن لحاظ می‌گردد. در شکل ۸ نمای کلی از مراحل انجام این کار نشان داده شده است.

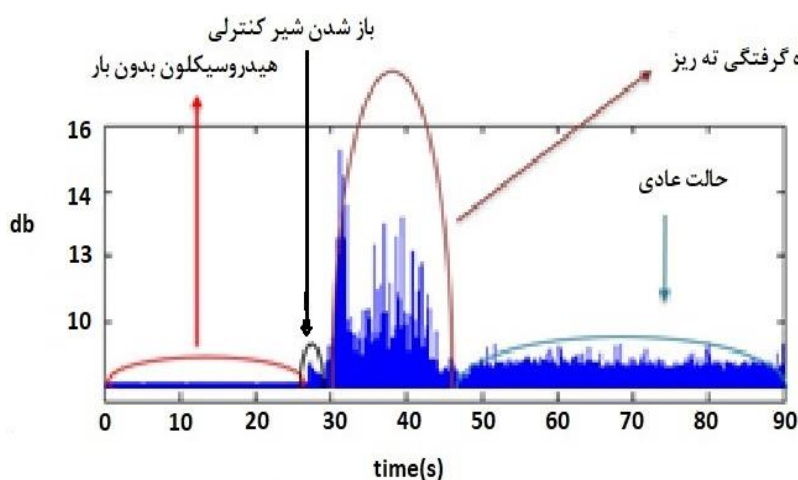
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج حاصل از داده‌برداری‌های شتاب‌سنج تک محوره

نتایج حاصل از داده‌برداری‌ها نشان داد، سیگنال ارتعاشات هیدروسیکلون که به وسیله ارتعاش‌سنج اندازه‌گیری شد، از عوامل اخلاص‌گر محیط مانند شارژ گلوله آسیاهای اطراف و باز



شکل ۸: نمای کلی از مراحل ساخت حسگر



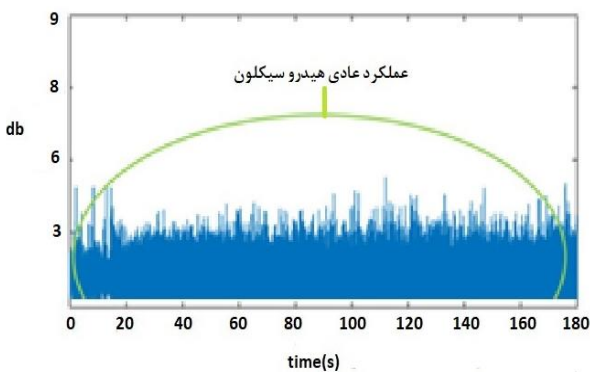
شکل ۹: آنالیز ارتعاشات هیدروسیکلون با حسگر ارتعاش‌سنج در شرایط مختلف کاری در محیط متلب

جدول ۳: متوسط نرخ ارتعاشات پس از ۲۰ بار اندازه‌گیری با استفاده از ارتعاش‌سنج شرکت Techneko

زمینه (Background noise)	باز شدن دریچه	گرفتگی	عادی	
۰٫۴۵	۱٫۴۶	۱۱	۶٫۰۲	متوسط (dB)
۰٫۵۷	۰٫۹۷	۸٫۶۵	۳٫۸۴	انحراف معیار (dB)



شکل ۱۰: نصب حسگر ارتعاشی پیزوالکتریک



شکل ۱۱: نمایش تغییر ارتعاشات در شرایط عادی عملکرد هیدروسیکلون

و شرایط بحرانی می‌شود، میزان نوسانات شدت دامنه سیگنال ارتعاشی افزایش می‌یابد و این تغییرات به بیش از ۲۰ دسی‌بل تغییر می‌یابد. نکته قابل توجه نشان داده شده در شکل ۱۰، نوسان ناشی از باز شدن شیر کنترلی است. تغییرات اختلال‌گر ناشی از باز و بسته شدن شیر کنترلی، در بازه زمانی کوتاه و با شدت کم است و با تعریف در منطق کنترلی می‌توان این تغییرات را نادیده گرفت.

متوسط نرخ ارتعاشات پس از ۲۰ بار اندازه‌گیری و داده‌برداری با استفاده از ارتعاش‌سنج شرکت Techneko در حالت‌های عادی، ایجاد گرفتگی و باز شدن دریچه در جدول ۳ نشان داده شده است. علاوه بر این موارد، میزان ارتعاشات زمینه (Background noise) در نظر گرفته شده است تا میزان بارز بودن داده‌ها از خطای زمینه تاثیر نپذیرد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود متوسط نرخ ارتعاشات در زمان گرفتگی تفاوت قابل ملاحظه‌ای با شرایط عادی کار هیدروسیکلون دارد. نکته مهم دیگر افزایش بیش از ۲ برابری نوسان در زمان ایجاد گرفتگی است. مجموع این موارد نشان‌دهنده این است که می‌توان از تحلیل ارتعاشات در شرایط مختلف کاری هیدروسیکلون برای نشان داده شرایط غیرعادی آن استفاده کرد.

نتایج داده‌برداری از سیکلون‌های مختلف در خوشه نشان داد میزان دامنه سیگنال ارتعاش هر سیکلون با سیکلون دیگر متفاوت است، بنابراین مانند آنچه در شکل ۷ نشان داده شد، با ساخت میراگر لاستیکی به اضافه تنظیم گشتاور سفت کردن کلیه پیچ‌های پایه هیدروسیکلون، میزان ارتعاش هیدروسیکلون‌ها با هم برابر و استاندارد شد. همچنین نتایج داده‌برداری از نقاط مختلف هیدروسیکلون نشان داد که محل اتصال بین سازه و سیکلون نقطه مناسبی از نظر سیگنال‌های ارتعاش و موارد تعمیراتی برای جایگذاری سنسور است.

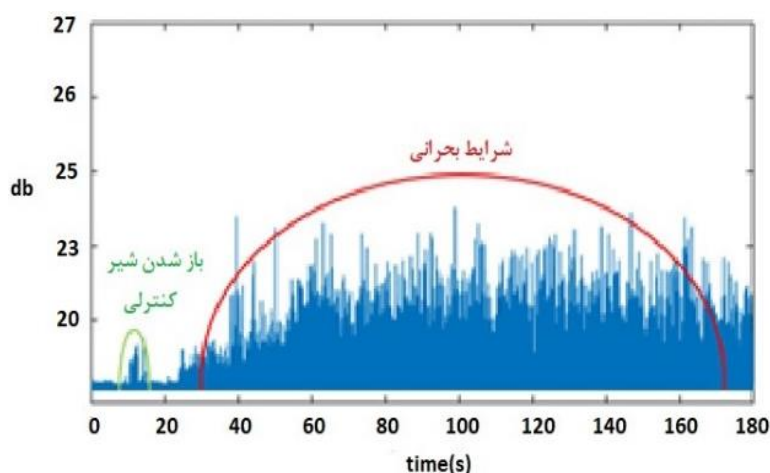
### ۳-۲- نتایج حاصل از حسگر پیزوالکتریک نصب شده بین پایه هیدروسیکلون و سازه اصلی

نتایج داده‌برداری‌ها در محل اتصال بین هیدروسیکلون و سازه اصلی نشان داد اختلاف بارز بین حالت بحرانی و حالت عادی کاری بارز است، بنابراین حسگر صنعتی ارتعاشی از نوع پیزوالکتریک طراحی و ساخته و در محل اتصال هیدروسیکلون و سازه اصلی (درون میراگر ارتعاشی) نصب شد (شکل ۱۰).

نمودار داده‌های حاصل از حسگر پیزوالکتریک که در نرم‌افزار متلب رسم شده است، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این نمودار ارتعاشات در بازه زمانی ۳ دقیقه‌ای نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، زمانی که هیدروسیکلون عملکرد عادی خود را دارد، میزان شدت امواج ارتعاشی کمتر از ۳ دسی‌بل قرار دارد.

مانند آنچه در شکل ۱۲ نشان داده شده است، زمانی که عملکرد هیدروسیکلون به دلیل گرفتگی از شرایط عادی خارج





شکل ۱۲: نمایش تغییر ارتعاشات در شرایط بحرانی عملکرد هیدروسیکلون

جدول ۴: متوسط نرخ ارتعاشات پس از ۲۰ بار اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه شتاب‌سنج و حسگر پیزوالکتریک

زمینه (Background noise)	باز شدن دریچه	گرفتگی	عادی	روش داده‌برداری
۰	۷	۱۵	۱۰	شتاب‌سنج و نرم‌افزار متلب
۷	۲۰	۲۳	۱۳	حسگر پیزوالکتریک

همان‌طور که این نتایج نشان می‌دهد، تفاوت حالت بحرانی و عادی بیش از ۱۰ برابر است که نشان‌دهنده تغییر بارز میزان دامنه سیگنال ارتعاشات است. جهت بررسی دقیق‌تر میزان اختلافات در شرایط مختلف، متوسط نرخ ارتعاشات پس از ۲۰ بار اندازه‌گیری و داده‌برداری با استفاده از دستگاه شتاب‌سنج و تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار متلب و همچنین حسگر ساخته شده بر مبنای اثر پیزوالکتریک در حالت‌های عادی، ایجاد گرفتگی و باز شدن دریچه به دست آمد که در جدول ۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که این جدول و نتایج قبل نشان داد متوسط دامنه ارتعاشات در زمان گرفتگی تفاوت قابل ملاحظه‌ای با شرایط عادی کار هیدروسیکلون دارد.

بنابراین همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود برای کنترل داده‌ها و اعلام هشدار، مدار الکترونیکی طراحی و ساخته شد. برای این مدار نمایشگری تعبیه گردید که نمایش‌دهنده وضعیت عملکردی هیدروسیکلون است و عملکرد هیدروسیکلون شامل وضعیت عادی و بحرانی را نشان می‌دهد. به مدار مربوطه آژیر هشدار وصل شد تا در صورت بحرانی شدن شرایط (وقوع گرفتگی و درشت شدن سرریز هیدروسیکلون)، هشدار دهد. این تجهیز پس از آزمایش و کالیبره کردن در شرایط محیط، روی یکی از هیدروسیکلون‌های اولیه کارخانه تغلیظ ۲ فاز ۲ مجتمع مس سرچشمه نصب شد و به صورت بر خط، کار پایش وضعیت هیدروسیکلون را انجام می‌دهد.

نتایج دانه‌بندی حاصل از نمونه‌برداری در زمان گرفتگی و شرایط عادی کار هیدروسیکلون نشان داد تفاوت قابل



شکل ۱۳: حسگر ساخته شده بر مبنای پدیده پیزوالکتریک همراه برد و آژیر هشدار

ملاحظه‌ای در دانه‌بندی ذرات سرریز وجود دارد. در شکل ۱۴ نمونه‌ای از دانه‌بندی انجام شده از سرریز در زمان گرفتگی و شرایط عادی کار هیدروسیکلون نشان داده شده است.

- نتایج تغییرات دامنه سیگنال ارتعاش حسگر پیزوالکتریک در محل اتصال بین پایه هیدروسیکلون و سازه اصلی با نتایج سیگنال ارتعاش سنج کاملاً منطبق است و نتایج داده برداری نشان داد، زمانی که هیدروسیکلون عملکرد عادی خود را دارد، میزان دامنه سیگنال ارتعاشی حسگر پیزوالکتریک کمتر از ۳ دسی بل بود و در صورتی که عملکرد هیدروسیکلون از شرایط عادی خارج و شرایط بحرانی شود، میزان نوسانات دامنه سیگنال ارتعاشی افزایش و این تغییرات به بیش از ۲۰ دسی بل تغییر می یابد.

- میزان  $K_{80}$  (اندازه ای که ۸۰٪ ذرات از آن کوچکتر است) سرریز به دست آمده در شرایط عادی و گرفتگی به ترتیب برابر ۱۱۹ و ۷۲۵ میکرون بود. این تفاوت بسیار زیاد ناشی از منتقل شدن بدون طبقه بندی مواد به سرریز است که صدمه های زیادی را به بازبایی و عملکرد سلول های فلوتاسیون وارد می کند.

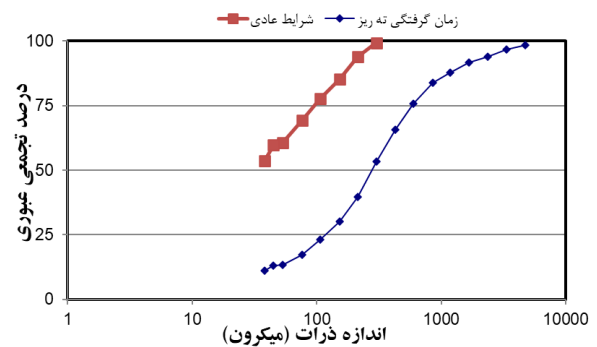
در ادامه این حسگر برای استفاده در شرایط صنعتی، طراحی و ساخته شد. این تجهیز پس از آزمایش و کالیبره کردن در شرایط محیط، روی یکی از هیدروسیکلون های اولیه کارخانه تغلیظ ۲ فاز ۲ مجتمع مس سرچشمه نصب شد و به صورت بر خط، کار پایش وضعیت هیدروسیکلون را انجام می دهد. با اعلام هشدار سیستم، مراجعه مراقبت کار فرآیند به خوشه هیدروسیکلون انجام می شود. هیدروسیکلون معیوب از مدار خارج و کار رفع انسداد آن انجام می شود.

#### ۵- سپاس گذاری

از مدیران و کارکنان مجتمع مس سرچشمه که همکاری های لازم برای اجرای این تحقیق عملی را داشتند و همچنین اجازه دادن انتشار این مقاله، تشکر به عمل می آید.

#### ۶- مراجع

- [1] Poursaedi, M., Shamsadini, R., Arghavani, E., and Banisi, S. (2012). "Increasing Efficiency of Initial Grinding Circuit of Share-Babak Copper Complex Concentration Plan". Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 2(4): 88-92 (In Persian).
- [2] Gupta, A., and Yan, D. S. (2006). "Mineral Processing Design and Operation: An introduction". Elsevier, 354-400.
- [3] Wills, B. A., and Finch, J. A. (2015). "Wills' Mineral



شکل ۱۴: نمودار دانه بندی سرریز هیدروسیکلون در شرایط عادی و گرفتگی ته ریز

میزان  $K_{80}$  (اندازه ای که ۸۰٪ ذرات از آن کوچکتر است) سرریز به دست آمده در شرایط عادی و گرفتگی به ترتیب برابر ۱۱۹ و ۷۲۵ میکرون بود. این تفاوت بسیار زیاد ناشی از منتقل شدن بدون طبقه بندی مواد به سرریز است که صدمه های زیادی را به بازبایی و عملکرد سلول های فلوتاسیون وارد می کند. این موضوع نشان دهنده این مطلب است که استفاده از حسگرهای مورد تحقیق تا چه میزان به افزایش کارایی مدارهای فرآوری کمک کند.

#### ۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف پایش وضعیت هیدروسیکلون های مجتمع مس سرچشمه به وسیله طراحی و ساخت حسگر تشخیص درشت شدن ذرات سرریز هیدروسیکلون های اولیه، انجام گرفت. در این راستا ابتدا با روش های مختلف کار داده برداری انجام گرفت و نتایج حاصل نشان داد:

- آنالیز دامنه سیگنال ارتعاشات هیدروسیکلون، روشی مناسب برای پایش وضعیت هیدروسیکلون ها است، چرا که این روش تاثیری از عوامل اخلاص گر محیط نپذیرفت.

- هنگامی که ذرات عبوری از سرریز هیدروسیکلون درشت شد، دامنه سیگنال ارتعاشات اندازه گیری شده با ارتعاش سنج نیز، افزایش یافت؛ نتایج اولیه آنالیز سیگنال ارتعاشات پس از ۲۰ بار اندازه گیری با استفاده از ارتعاش سنج نشان داد متوسط نرخ ارتعاشات از میزان ۶ دسی بل در زمان عادی به ۱۱ دسی بل در زمان گرفتگی افزایش یافت. از طرفی میزان انحراف معیار از ۳٫۸ به ۸٫۶ افزایش یافت. این میزان اختلاف نشان داد می توان از تحلیل ارتعاشات برای تشخیص گرفتگی هیدروسیکلون استفاده کرد.

- [16] Van Deventer, J. S. J., Feng, D., Petersen, K. R. P., and Aldrich, C. (2003). "Modelling of hydrocyclone performance based on spray profile analysis". *International Journal of Mineral Processing*, 70(1): 183-203. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00002-4).
- [17] Janse van Vuuren, M. J., Aldrich, C., and Auret, L. (2011). "Detecting changes in the operational states of hydrocyclones". *Minerals Engineering*, 24(14): 1532-1544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.08.002>.
- [18] Janse van Vuuren, M. J., Aldrich, C., Auret, L., Bezuidenhout, C., and De Jager, C. (2010). "Online monitoring of hydrocyclones by use of image analysis". *IFAC Proceedings Volumes*, 43(9): 87-91. DOI: <https://doi.org/10.3182/20100802-3-ZA-2014.00021>.
- [19] Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G. (2017). "ImageNet classification with deep convolutional neural networks". *Communications of the ACM*, 60(6): 84-90. <https://doi.org/10.1145/3065386>.
- [۲۰] حجت، ی.، شیرکش، م.؛ ۱۳۹۸؛ "اصول و کاربردهای پیروالکترونیک". انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۱۶۸ صفحه.
- [4] Ranjbar, M., and Sam, A. (2011). "Hydrocyclone Diameter Selection Using a Modified Particle Density Correction Factor". *Iranian Journal of Mining Engineering*, 6(11): 43-48. (In Persian).
- [5] Giglia, K. C., and Aldrich C. (2020). "Operational state detection in hydrocyclones with convolutional neural networks and transfer learning". *Minerals Engineering*, 149: 106211.
- [6] Williams, R. A., Jia, X., West, R. M., Wang, M., Cullivan, J. C., Bond, J., and Payton, D. (1999). "Industrial monitoring of hydrocyclone operation using electrical resistance tomography". *Minerals Engineering*, 12(10): 1245-1252.
- [7] Gutiérrez, J. A., Dyakowski, T., Beck, M. S., and Williams, R. A. (2000). "Using electrical impedance tomography for controlling hydrocyclone underflow discharge". *Powder Technology*, 108(2): 180-184
- [8] Hou, R., Hunt, A., and Williams, R. A. (2002). "Acoustic monitoring of hydrocyclones". *Powder Technology*, 124(3): 176-187. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00025-6).
- [9] Cirulis, D., and Russell, J. (2011). "Cyclone Monitoring System Improves Operations at KUC's Copperton Concentrator". *Engineering and Mining Journal*, 212(10): 44-49.
- [10] Cirulis, D., and Jerin, R. (2017). "Cidra cyclonetrac SM at Kennecott Utah copper". *International Mining*, 1-20.
- [11] Buttlar, B. (2016). "New mining sensors go wireless, smart cyclone delivers new opportunities". *FLSmidth wireless wear detection and roping detection sensors*, FLSmidth catalogs, <https://www.flsmidth.com>.
- [12] Neesse, T., Schneider, M., Golyk, V., and Tiefel, H. (2004). "Measuring the operating state of the hydrocyclone". *Minerals Engineering*, 17(5): 697-703.
- [13] MINTEK, (2011). "CyLas: Keeping an eye on your cyclone [Brochure]". Retrieved from. <http://www.mintek.co.za/wp-content/uploads/2011/09/CyLas-brochure-en.pdf>.
- [14] Murphy, K. P. (2012). "Machine learning : a probabilistic perspective". MIT Press, Cambridge, MA, pp. 1067.
- [15] Petersen, K. R. P., Aldrich, C., van Deventer, J. S. J., McInnes, C., and Stange, W. W. (1996). "Hydrocyclone underflow monitoring using image processing methods". *Minerals Engineering*, 9(3): 301-315. DOI: [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00015-5](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00015-5).

<sup>1</sup> Williams et al

<sup>2</sup> electrical resistance tomography

<sup>3</sup> Cidra.

<sup>4</sup> OMS (Oversize Monitoring System)

<sup>5</sup> Particle Size Tracking

<sup>6</sup> FL Smidth

<sup>7</sup> Smart Hydrocyclone

<sup>8</sup> Wireless

<sup>9</sup> Nesse

<sup>10</sup> MINTEK

<sup>11</sup> Petersen et al

<sup>12</sup> Van Deventer et al.

<sup>13</sup> convolutional neural networks

<sup>14</sup> Giglia

<sup>15</sup> Aldrich

<sup>16</sup> transfer learning

<sup>17</sup> MATLAB

<sup>18</sup> Piso Electric



## The Hydrocyclones Performance Monitoring Based on Vibration Wave Analysis at Sarcheshmeh Processing Plant

Roomyani Sh.<sup>1</sup>, Maleki-Moghaddam M.<sup>2\*</sup>, Halavati H.<sup>3</sup>

1- M.Sc, Dept. of Mining, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran  
shahabrm7@gmail.com

2- Associate Professor, Dept. of Mining, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran  
m.maleki@vru.ac.ir

3- M.Sc, Research and Development Center, Sarcheshmeh Copper Complex, Rafsanjan, Iran  
halavati@iran.ir

(Received: 15 Aug. 2020, Accepted: 10 Jan. 2021)

**Abstract:** Hydrocyclone is one of the main important equipment applied for the classification of materials in mineral processing plants. Presence of coarse particles in the hydrocyclone overflow adversely affects the performance of the downstream processes. This research was carried out to provide a solution for these problems by using vibrational wave analysis. The results of vibrometer analysis showed that the average rate of vibrational signal increased from 6 dB at normal condition to 11 dB at the chock condition and variation increased more than 2 times. To stabilize the hydrocyclone vibratory behavior, a rubber layer was fitted under the hydrocyclone base and tightened with an equal torque. In order to reduce the cost and increase the accuracy of the work a piezoelectric sensor was manufactured and installed by designing the printed circuit board and installing an alarm. Analysis of piezoelectric sensor data showed that the average vibrational amplitude increases from 13 dB at normal time to 23 dB during clogging. The size distribution results showed that the amount of K80 (the size at which 80% of the particles are smaller) increased from 119 microns under normal conditions to 725 microns during clogging due to the miss classification of materials transferred to the overflow. This result indicated by using these sensors the efficiency of mineral processing circuits increases significantly.

**Keywords:** Ball mill, Liner, Lifter angel, Sarcheshmeh.

### INTRODUCTION

Coarse particle in the hydrocyclone overflow decreases the flotation efficiency, increases the fracture and failure of the rotor and stator, enhances the formation of sediments in the primary flotation cells, and reduce the valuable mineral recovery. A typical hydrocyclone (Figure 1) consists of a conically shaped vessel, open at its apex, joined to a cylindrical section, which has a tangential feed inlet. The top of the cylindrical section is closed with a plate through which passes an axially mounted overflow pipe. The pipe is extended into the body of the cyclone by a short, removable section known as the vortex finder.



The vortex finder forces the feed to travel downward, which prevents short-circuiting of feed directly into the overflow. The feed is introduced under pressure through the tangential entry, which imparts a swirling motion to the pulp. This generates a vortex in the cyclone, with a low pressure zone along the vertical axis. An air core develops along the axis, normally connected to the atmosphere through the apex opening, but in part created by dissolved air coming out of solution in the zone of low pressure [1]. Hydrocyclones are used in many and various duties in mineral processing flowsheets. There is a wide range of sizes, styles and fittings to select from, however, and the focus of this paper is to provide a basis to specify a hydrocyclone for a given application. A general description of how a hydrocyclone works is included to provide background to the discussion of process and hydrocyclone geometry variables [2]. Uniform feed conditions regarding solids concentration and particle size distribution are a precondition for a good separation efficiency of hydrocyclones. Varying feed conditions lead to considerable fluctuations of the cut size and the separation sharpness [3]. Over the last years, efforts have been made to devise proper monitoring techniques to allow better control of hydrocyclone performance [4-10].

This study was carried out at the Sarcheshmeh copper complex located southeast of Iran. At the new concentration plant of the Sarcheshmeh copper complex which comprises of two parallel phases, two (9.75×4.87 and 9×4.87m) SAG mills are used to grind a feed all under 17.5 cm which is the product of a gyratory crusher. The discharge of the SAG mill is transferred onto a vibrating screen. The oversize material is crushed in a pebble crusher and the undersize is combined with the ball mill (6.71×9.91 m) discharge and is sent to the cyclones. This paper presents a solution to the challenge of maintaining the optimal particle size in these hydrocyclones overflow.

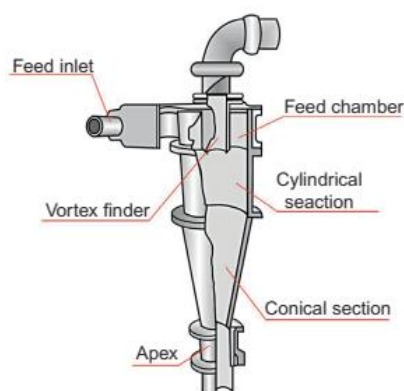


Figure 1. Main components of hydrocyclone [1]

## METHODS

Due to the fact that time of the hydrocyclone plugging was not clear, synthetic clogging of hydrocyclone was performed in the sampling intervals. Due to the low cost and operational nature of vibration signal recording, sampling was performed by measuring the amplitude of the vibration signal. Thus, vibrations were measured in different modes of hydrocyclone performance to determine the axis at which there is the greatest response. Data acquisition was performed under different operating conditions that included the normal state of operation, the critical state resulting from the plugging and the no load conditions. The analysis of data performed by the MATLAB software.

In order to use the vibration sensor and make it operational in the industry, it was necessary to reduce costs and increase the accuracy of detection. To achieve this, a sensor was designed and built based on the use of electrical pressure phenomenon (piezoelectric phenomenon). The sensor was placed inside a layer of rubber (vibration damping) under the hydrocyclone bases.

## FINDINGS AND ARGUMENT

This paper presents a solution to the challenge of maintaining the optimal particle size in the flotation feed.

In general, reducing the amount of coarse material whilst maintaining throughput can significantly improve cash flow. The results showed that the hydrocyclone vibration signal was not affected by environmental disturbances such as the ball mill charging. To investigate the vibration signal in different conditions, the average vibration rate after 20 times of measurement using an accelerometer and piezoelectric sensor in normal conditions, clogging and opening of the valve was obtained, which is shown in Table 1.

**Table 1.** Vibration rate (dB) average after 20 times measurement using accelerometer and piezoelectric sensors

Method	Valve opening	Clogging condition	Normal condition	Background noise
Accelerometer	7	15	10	0
Piezoelectric sensor	20	23	13	7

As the result indicated the average vibration amplitude increases from 13 dB at normal time to 23 dB during clogging. Thus an industrial sensor was designed and installed on one of the phase 2 concentration plant hydrocyclones at Sarcheshmeh Copper Complex. The size distribution results showed that the amount of  $K_{80}$  (the size at which 80% of the particles are smaller) increased from 119 microns in normal conditions to 725 microns in clogging condition due to the miss classification of materials transferred to the overflow. This result indicated by using these sensors the efficiency of mineral processing circuits increases significantly.

## CONCLUSIONS

This paper presents a solution to the challenge of maintaining the optimal particle size in the flotation feed. Due to the fact that time of the hydrocyclone plugging was not clear, synthetic clogging of hydrocyclone was performed in the sampling intervals. Due to the low cost and operational nature of vibration signal recording, sampling was performed by measuring the amplitude of the vibration signal. Thus, vibrations were measured in different modes of hydrocyclone conditions.

The results indicated that vibration signals not affected by the environmental disturbance and a clear distinction between the critical state (large particles entering the overflow) and the normal operational condition was detected. In order to reduce the cost and increase the accuracy of the work a piezoelectric sensor was manufactured and installed. The results obtained by piezoelectric sensor showed that this sensor is more accurate than vibrating sensor. Analysis of piezoelectric sensor data showed that the average vibrational amplitude increases from 13 dB at normal time to 23 dB during clogging. The size distribution results showed that the amount of  $K_{80}$  (the size at which 80% of the particles are smaller) increased from 119 microns under normal conditions to 725 microns during clogging due to the miss classification of materials transferred to the overflow.

## REFERENCES

- [1] Wills, B. A., and Finch, J. A. (2015). *Will's Mineral Processing Technology*. 8nd Ed., Elsevier.
- [2] Gupta, A., and Yan, D. S. (2006). *Mineral Processing Design and Operation: An introduction*. Elsevier.
- [3] Neesse, T., Schneider, M., Golyk, V., and Tiefel, H. (2004). *Measuring the operating state of the hydrocyclone*. Minerals Engineering, 17(5): 697-703.
- [4] Ranjbar, M., and Sam, A. (2011). *Hydrocyclone Diameter Selection Using a Modified Particle Density Correction Factor*. Iranian Journal of Mining Engineering, 6(11): 43-48. (In Persian).
- [5] Gigliaa, K. C., and Aldrich C. (2020). *Operational state detection in hydrocyclones with convolutional neural networks and transfer learning*. Minerals Engineering, 149: 106211.
- [6] Cirulis, D., and Russell, J. (2011). *Cyclone Monitoring System Improves Operations at KUC's Copperton Concentrator*. Engineering and Mining Journal, 212(10): 44-49.

- [7] Cirulis, D., and Jerin, R. (2017). "*Cidra cyclonetrac SM at Kennecott Utah copper*". International Mining, 1-20.
- [8] Buttler, B. (2016). "*New mining sensors go wireless, smart cyclone delivers new opportunities*". FLSmidth wireless wear detection and roping detection sensors, FLSmidth catalogs, <https://www.flsmidth.com>.
- [9] Van Deventer, J. S. J., Feng, D., Petersen, K. R. P., and Aldrich, C. (2003). "*Modelling of hydrocyclone performance based on spray profile analysis*". *International Journal of Mineral Processing*, 70(1): 183-203. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00002-4).
- [10] Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G. (2017). "*ImageNet classification with deep convolutional neural networks*". *Communications of the ACM*, 60(6): 84-90. <https://doi.org/10.1145/3065386>.