

# کنترل سلول فلوتاسیون ستونی آزمایشگاهی با استفاده از منطق فازی

## بابک وکیلی آذر

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

## محمد کلاهدوزان

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

## منوچهر اولیازاده

دانشیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

## رضا سناجیان

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۳/۷/۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۱۱/۲۴، تاریخ تصویب ۸۴/۳/۷)

## چکیده

فلوتاسیون ستونی از جمله روشهایی است که طی سالیان اخیر به علت افزایش راندمان تولید و هزینه های اجرایی کمتر در مقیاس صنعتی، پیشرفت قابل ملاحظه ای را شاهد بوده است. در این روش که بر اساس حرکت مواد آبران به سمت سطح در طول ستون بلندتر انجام می گیرد میزان بازیابی بیشتر خواهد شد. وجود آب شستشو در راس ستون به منظور شستن کف خارج شده نیز باعث افزایش عیار می گردد. در این بین اعمال کنترل مناسب بر روی این فرآیند باعث بهبود نتایج خواهد شد که در عمل به علت عدم وجود ابزار اندازه گیری با صحت زیاد و وجود روابط پیچیده ریاضی بین متغیرهای درون سلول و غیرقابل پیش بینی بودن مقادیر کمی حاصل از اندرکنشهای متغیرهای مختلف با دشواری مواجه است. در این مقاله چگونگی استفاده از منطق فازی جهت کنترل یکی از پارامترهای مهم سلول (ارتفاع سطح کف) و چگونگی ابزاربندی و اندازه گیری متغیرها جهت حصول این مهم آورده شده است. مطالعه موردی با استفاده از کانسنگ مس سولفور معدن چهل کوره یزد، کنترل کننده فازی و آب شستشو در راس ستون انجام گرفت و در میزان راندمان عملیات و عیار مس به ترتیب ۲۳/۳۹٪ و ۴۲/۲۸٪ بهبود حاصل گردید.

**واژه های کلیدی:** فلوتاسیون ستونی، ابزاربندی، متغیرهای کنترلی ومدیریتی، منطق فازی

## مقدمه

شوند. ذرات آبرگیر نیز به سمت پایین سلول حرکت کرده و در آنجا از طریق مجرای ته ریز به عنوان باطله فلوتاسیون از سلول خارج می شوند. در طول مدتی که سلول به طور معمول کار می کند دو بخش قابل تشخیص در داخل سلول وجود دارد که عبارتند از: ناحیه جمع آوری<sup>۱</sup> که در آن ذرات آبران توسط حبابهای تزریق شده توسط حباب ساز به داخل پالپ جمع آوری می شوند و ناحیه شستشو یا ناحیه کف<sup>۲</sup> که بخش عمده آن (۹۰٪ - ۶۰٪) توسط هوا یا گاز اشغال شده است و ذرات جمع آوری شده را در خود جای می دهد [۲]. جهت عملکرد بهینه در بازیافت ذرات در ستون فلوتاسیون

سلولهای فلوتاسیون ستونی، سلولهای عمودی و بلندی هستند که بطور پیوسته با پالپ (۴۰٪-۱۰٪ جامد) تغذیه می شوند و ابعاد ذرات جامد تشکیل دهنده پالپ بین ۱۰-۱۰۰ μm می باشد. هوا دهی بصورت پیوسته توسط وسیله ای بنام اسپارژر(حباب ساز) که در پایین سلول قرار گرفته بصورت حبابهای ریز در داخل پالپ تزریق می شود و این امر باعث حرکت رو به بالای ذرات حباب در داخل سلول می گردد [۱]. درون سلول ذراتی که از قبل با اضافه شدن مواد شیمیایی مختلف آبران شده اند بعد از برخورد با حبابهای هوا به آنها چسبیده و به سمت بالا حرکت می کنند و در سطح پالپ در بالای سلول بعنوان کنسانتره فلوتاسیون بازیافت می

## ۲- رژیم جریان آشفته<sup>۴</sup>

در مدتی که جریان حاکم بر سیستم از نوع حبابی است پارامترهای مختلف موجود در ستون دارای تاثیرات قابل پیش بینی نسبت به یکدیگر بوده و تغییرات ایجاد شده در یک متغیر جهت ایجاد تغییر در متغیر دیگر شدت تاثیر بیشتری دارد و بطور کلی می توان گفت جهت ایجاد پایداری و یا جهت اعمال کنترل، شرط اول، حاکم کردن این جریان بر سیستم است. کاهش شدت تاثیر تغییرات ایجاد شده جهت اصلاح متغیری به معنی نزدیک شدن به جریان آشفته است. در این نوع جریان اعمال کنترل ممکن نیست و باید از دو متغیر ورودی پالپ و به خصوص نرخ گاز دهی برای برگرداندن جریان حاکم بر سیستم به نوع حبابی استفاده شود [۱].

هدف از این طرح، مطالعه در چگونگی کنترل شرایط پایداری ستون فلوتاسیون با منطق بشری و هیوریتیک و در نتیجه اعمال این نوع کنترل (کنترل با استفاده از منطق و استنتاج فازی) بر سلول می باشد. طبیعی است برای رسیدن به این هدف ابتدا نیاز به اجرای ابزاربندی و تجهیز سلول به ملزومات اولیه است.

## ابزاربندی و تجهیز

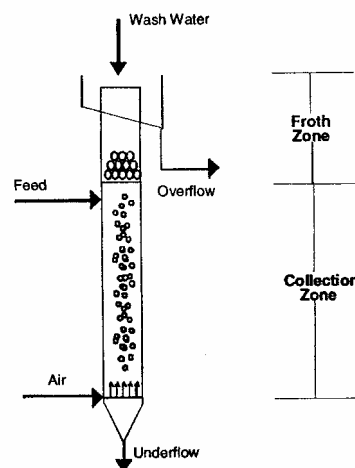
سلول فلوتاسیون مورد بحث (شکل ۲) از قسمتهای مختلفی تشکیل یافته است که عبارتند از: ساختمان سلول و تجهیزات مربوط به کنترل متغیرهای مدیریتی، حسگرها، تجهیزات تبدیل، تقویت و انتقال داده ها به پردازشگر سیستم، پردازشگر، تجهیزات انتقال و تبدیل فرمان به عملگرها، محرکها و عملگرها و نهایتاً سیستم مانیتورینگ.

این سلول از یک لوله پلکسی گلاس به قطر ۵۰ میلیمتر و به طول ۳/۵ متر تشکیل شده است که جهت نگهداری و پایداری آن از یک چهارچوب فلزی استفاده گردیده و سلول در داخل آن تراز و محکم شده است.

جهت تامین بار اولیه از یک ظرف پلی اتیلنی ۶۰ لیتری و یک همزن الکتریکی که برای آن طراحی و ساخته شده استفاده گردیده است. پالپ آماده شده در این ظرف از طریق یک پمپ پرستالتیک (شکل ۳) با بیشینه قدرت پمپاژ ۲/۵ لیتر بر دقیقه به داخل سلول از ارتفاع ۰/۹ متری از بالای سلول به درون سلول پمپاژ می شود. به منظور اعمال تغییرات در میزان پمپاژ این پمپ باید در

نیاز به ساختار عمیق ناحیه کف با ارتفاع و چگالی مناسب می باشد. اضافه شدن آب شستشو از بالای سلول بر روی ستون کف این امکان را می دهد تا با جدا شدن مجموعه حباب- ذرات آبران، از ذرات آگیری که بصورت اتفاقی یا تحت شرایط خاصی به درون ناحیه کف نفوذ کرده اند، باعث افزایش میزان بازیافت نهایی شود و این امر رخ نخواهد داد مگر در شرایطی که آب شستشو از درون ناحیه کف گذشته و به درون ناحیه جمع آوری نفوذ کند. این عمل با آب بایاس (آب جهت ده) طراحی و تنظیم می شود. در واقع آب بایاس درصدی از آب شستشو است که از ناحیه کف عبور کرده و وارد ناحیه جمع آوری می شود [۲].

آب شستشو در قسمت فوقانی سلول و پایین تر از لبه خروجی سر ریز و یا بالاتر از آن قرار گرفته و به کف تولید شده در سطح پالپ پاشیده می شود و به این طریق ذرات آگیری را که به حبابها چسبیده اند از آنها جدا می کند. معمولاً ورودی آب شستشو از طریق لوله های متخلخل ساخته می شود. خوراک ورودی به صورت پالپ در ارتفاع یک سوم از سطح بالایی ستون و در مسیر حرکت حبابهای هوا وارد سلول می شود. حبابها نیز ذراتی که از قبل آبران شده اند را به سمت خود جذب کرده و به سطح پالپ حرکت منتقل می نمایند (شکل ۱). همانطور که در این شکل ملاحظه می شود بار اولیه تقریباً در بالاترین نقطه قسمت جمع آوری وارد ستون می شود [۲].



شکل ۱: نمایی کلی از یک سلول فلوتاسیون ستونی [۱].

بطور کلی دو نوع رژیم جریان عمده در ستون وجود دارد که عبارتند از:

۱- رژیم جریان حبابی<sup>۳</sup>

اعمال می شود. غیر از آب شستشوی اصلی که در رفتار سلول تاثیر دارد، سیستم آب پاشی دیگری وجود دارد که از آن جهت ایجاد سهولت در انتقال کف خارج شده از سلول (کنسانتره) استفاده شده تا مواد آبران انتخاب شده توسط کف براحتی از طریق لوله تخلیه در مخزن مخصوص کنسانتره یا سرریز (یک ظرف پلی اتیلنی ۶۰ لیتری) جمع آوری گردد. دبی این قسمت از طریق یک شیر ۱/۲ اینچ ۴۰۰N تنظیم می گردد که این شیر مستقیماً به شیر آب اصلی سیستم (آب شهر) متصل است. ابزار مورد استفاده در این بخش نیز یک دوش دایره ای شکل است که در بالای قسمت جمع آوری اولیه سرریز تنظیم و نصب شده است. ته ریز سیستم نیز از طریق یک شیر و یک پمپ پرستالتیک (همانند خوراک) کنترل و تنظیم می گردد. سیستم تامین حباب از سه بخش به شرح زیر تشکیل شده است.

بخش اول مربوط به تامین و تنظیم هوای فشرده است. هوای فشرده تولید شده بوسیله یک کمپرسور هوای معمولی توسط یک شیر اصلی هوای فشرده اختصاصی وارد سیستم می شود. فشار این هوای فشرده توسط یک فشار شکن کاهش یافته و سپس توسط یک تنظیم کننده فشار و دبی مغناطیسی تنظیم می گردد. این تنظیم کننده هوا مجهز به یک شیر مغناطیسی و یک صفحه مدرج است که اپراتور را در تنظیم دقیق فشار و دبی هوای فشرده وارد شده به سلول یاری خواهد داد. در واقع این قسمت توسط اپراتور و بصورت دستی تنظیم می شود.



شکل ۴: نمایی از دوشهای آب شستشوی سلول.

بخش دوم مربوط به تنظیم خود کار میزان دبی هوای منتقل شده به درون سلول (حباب ساز) می باشد که از

تعداد دوران در دقیقه موتور تغییراتی ایجاد نمود که این امر بوسیله یک کنترل کننده دور موتور، به هر دو صورت دستی اتوماتیک انجام می پذیرد.



شکل ۲: نمایی کلی از سلول آزمایشگاهی.

به علت متغیر بودن قدرت پمپاژ پمپها نسبت چگالی پالپ و درصد وزنی ذرات جامد در آن، فقط رفتار کیفی این ابزار اهمیت داشته و به لحاظ کمی، اهمیت خاصی در امر کنترل نخواهد داشت و در اینجاست که یک بار دیگر به اهمیت کنترل فازی که یک کنترل کیفی است پی برده می شود.

آب شستشو در این سلول از دو بخش تشکیل شده است (شکل ۴).



شکل ۳: پمپهای پرستالتیک تنظیم کننده دبی ورودی و خروجی خوراک و ته ریز.

بخش اول که در واقع همان آب شستشوی اصلی است و برای شستشوی کف درون سلول (سرریز) و جداسازی مواد نامطلوب از مجموعه حباب و ذرات بکار میرود. این قسمت از آب شستشو از طریق یک دوش به شکل + به سیستم

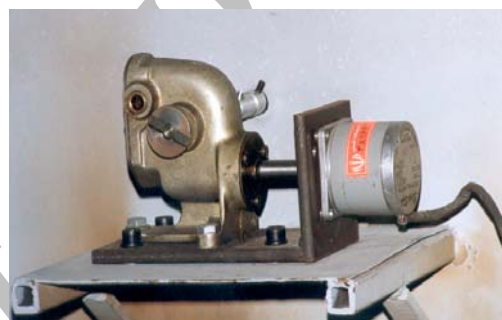
در سلول طراحی شده از سه حسگر دیافراگمی فشار که در ارتفاع های ۰/۶ متر، ۱/۴۰ متر و ۳/۴ متری از بالای سلول نصب شده اند استفاده شده است. همانطور که قبلا نیز ذکر شد این حسگرها به منظور استفاده از داده های مربوط به فشار در ارتفاعات مختلف و تخمین ارتفاع منطقه کف طراحی و نصب شده اند.

مقادیر حس شده توسط حسگرها که در واقع مقادیر خام غیر قابل درکی می باشند، می بایست پس از انتقال به پردازشگر و یا در مسیر این انتقال تبدیل به مقادیر قابل درک شوند تا بتوان از آنها در امر کنترل فرایند استفاده کرد [۳]. همانطور که ذکر شد، مقادیر اندازه گیری شده توسط هر کدام از حسگرها مقادیر الکتریکی خامی هستند که برای پردازشگر دارای معنی و شخصی نیستند. بنابراین جهت استفاده از این مقادیر می بایست آنها را با استفاده از مدار های مبدل به مقادیر معنی دار برای پردازشگر تبدیل کرده و پس از تقویت این داده ها با استفاده از مدارهای تقویت کننده اقدام به انتقال آنها توسط مدار های انتقال دهنده نمود که تمامی مراحل فوق در فاز اجرایی انجام گرفته است.

پردازشگر سیستم از یک کامپیوتر تشکیل شده است که نرم افزارهای لازم برای دریافت داده های ارسالی از حسگرها، پردازش داده ها و محاسبه مقادیر مربوط به متغیرهای کنترلی و در نهایت استخراج فرمان با استفاده از نرم افزار طراحی شده فازی در آن قرار دارد. این پردازشگر قادر به پردازش ۵۳۳ میلیون کاراکتر در ثانیه می باشد. البته با استفاده از نرم افزارهای طراحی شده، این امکان به سیستم داده می شود تا اطلاعات جدید در هر ثانیه وارد سیستم شود. فرمانهایی که پس از پردازش داده ها توسط پردازشگر و تعیین شدن بوسیله نرم افزار فازی صادر شده اند، جهت اعمال به عملگر ها نیاز به تغییراتی دارند تا توسط عملگر قابل درک باشند. به همین منظور و برای رسیدن به این هدف نیاز به واسطه هایی است تا این تبدیلات فرمان در آنها انجام شود که این مهم از طریق مدارهای الکترونیکی طراحی شده انجام می گیرد. بخش عملگر سیستم کنترل از دو قسمت محرک و عنصر نهایی تشکیل شده است. در واقع عملگرها برای کنترل و یا اعمال مدیریت بهینه بر روی متغیرهای مدیریتی استفاده می شوند. در این سیستم نیز با توجه به قسمتهای مختلف و نوع متغیر مدیریتی از عملگرهای

یک شیر کوچک مخصوص هوای فشرده تشکیل شده است و توسط یک موتور پله ای متصل به کامپیوتر قابل کنترل است. موتور پله ای باتوجه به فرمانهایی که از کامپیوتر (کنترل کننده فازی) دریافت می کند دوران پله ای چپ یا راست انجام می دهد. این دوران از طریق کوپلینگ خاصی که محور موتور پله ای را به شیر مخصوص هوای فشرده متصل کرده باعث تغییر دبی هوای فشرده خواهد شد (شکل ۵).

بخش سوم این قسمت اسپارژر و یا حباب ساز است که در این پروژه از نوع درونی آن استفاده شده است.



شکل ۵: موتور پله ای، گیربکس و شیر هوای فشرده جهت تنظیم اتوماتیک دبی هوای فشرده.

حباب ساز مذکور در قسمت انتهایی لوله سلول نصب شده است و دارای قطر ۲۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵ سانتیمتر می باشد (شکل ۶). لوله ته ریز سلول از قسمت انتهایی حباب ساز گرفته شده است. ته ریز سلول برای خروج از سلول می بایست از درون حباب ساز عبور کند که این امر به بالاتر رفتن راندمان کمک خواهد شد.



شکل ۶: حباب ساز ( اسپارژر).

۴- قابلیت اعمال تغییرات بصورت دستی در میزان پمپاژ هر کدام از پمپهای پریستالتیک.

### سیستم کنترل

جهت اعمال هر گونه کنترلی بر کار سلول نیاز به اطلاعاتی از نحوه کارکرد آن وجود دارد. بهترین پارامترهایی که می توانند بعنوان متغیرهای کنترلی لحاظ شوند متغیرهایی مانند عیار کنسانتره و میزان بازیافت کارکرد سلول بصورت فوری و پیوسته است که در عمل یا امکان انجام این کار نیست و یا در صورت امکان، روش بسیار پرهزینه ای است بطوریکه حتی با صرف هزینه های زیاد جهت عملیاتی کردن این روش، گاه جوابهای غیر دقیق و غیر واقعی در بر داشته است [۴]. بنابراین در اجراء این پروژه نیاز به پارامترهایی است که اندازه گیری و محاسبه آنها ساده تر و جواب این محاسبات نیز به واقعیت نزدیکتر باشد. از این رو ارتفاع کف به عنوان متغیر کنترلی در این سیستم انتخاب شد. طرق بسیاری جهت محاسبه و اندازه گیری این متغیر پیشنهاد شده است که می توان از روشهای فشار، چگالی، دما، هدایت الکتریکی و موارد دیگر نام برد که در این طرح با در نظر گرفتن امکانات موجود از روش فشار با استفاده از سه حسگر به شرح زیر استفاده شده است [۲ و ۱]. جهت اندازه گیری ارتفاع کف (متغیر کنترلی) از سه حسگر فشار که در ارتفاعهای مختلف ستون نصب گردیده استفاده شده است. سه حسگر فشار با آرایشی که در شکل (۸) نشان داده شده است بر روی سلول به ترتیب زیر نصب شده اند:

(۱) حسگر بالایی در ارتفاع ۶۰ سانتیمتری از بالای سلول ( $H_3$ ) که فشار درون سلول در آن ارتفاع را مشخص خواهد کرد ( $P_3$ ). (۲) حسگر میانی در ارتفاع ۱۴۰ سانتیمتری از بالای سلول ( $H_2$ ) که فشار درون سلول در این ارتفاع را نشان خواهد داد ( $P_2$ ) و در نهایت (۳) حسگر تحتانی در ارتفاع ۳۴۰ سانتیمتری از بالای سلول ( $H_1$ ) که فشار درون سلول در این ارتفاع از سلول را نشان می دهد ( $P_1$ ).

با توجه به شکل (۸) و روابطی که در زیر خواهد آمد، ارتفاع عمق کف در هر لحظه بدست می آید. در این روابط فشار در نقاط مختلف، ارتفاع بخشهای مشخص شده در شکل، چگالی نواحی جمع آوری یا کف و  $g$  شتاب

مختلفی استفاده شده است که در زیر شرح داده خواهد شد:

**خوراک** - در این قسمت از یک پمپ پریستالتیک به عنوان عنصر نهایی و یک موتور الکتریکی به عنوان محرک که از طریق یک کنترل کننده دور موتور کنترل می شود، استفاده شده است.

**ته ریز** - این قسمت نیز مشابه عملگرهای قسمت خوراک می باشد.

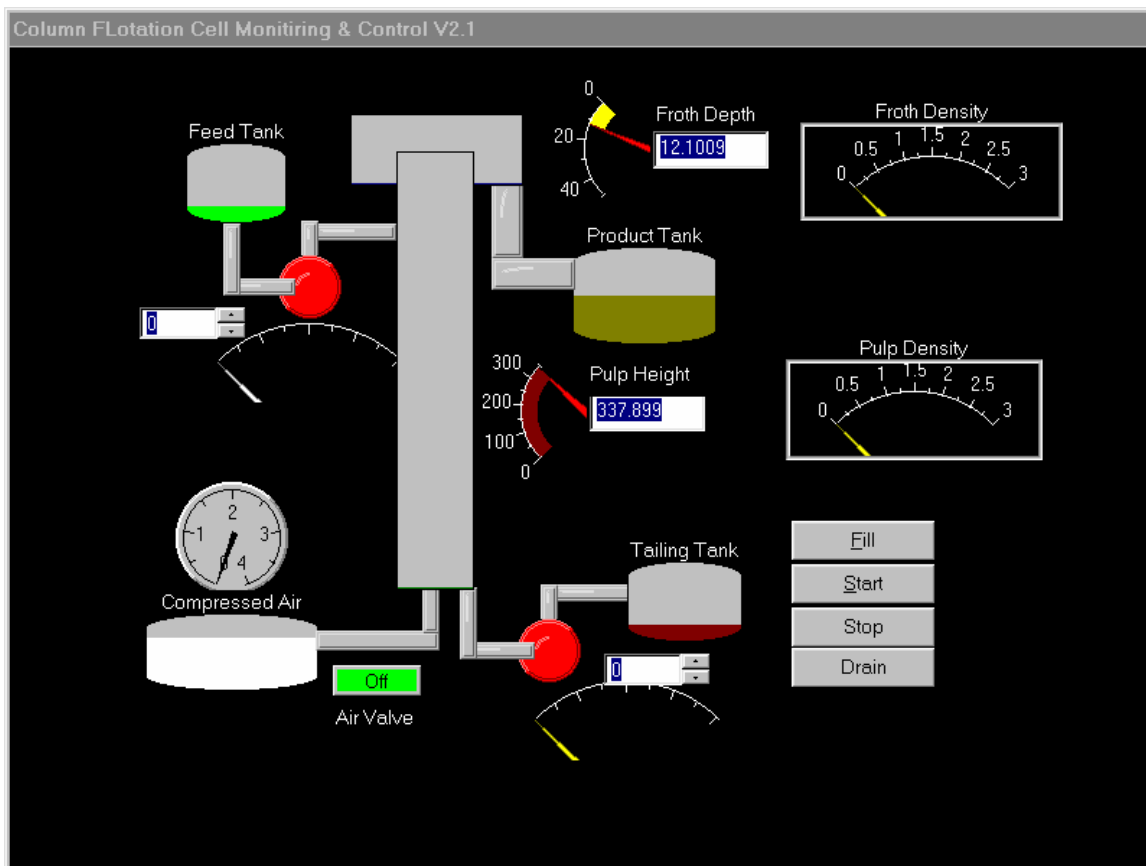
**آب شستشو** - در هر دو قسمت تشکیل دهنده بخش آب شستشو از عملگرهای دستی استفاده شده است و در واقع در این قسمت فقط عنصر نهایی به عنوان عملگر مورد استفاده قرار گرفته است.

**تامین حباب** - همانطور که قبلا اشاره شد به علت قسمتهای مختلف تشکیل دهنده این بخش، عناصر نهایی و محرکهای متنوعی در آن دارای نقش می باشند. در بخش اول در واقع شیر مغناطیسی (جهت قطع و وصل جریان هوا) یک محرک محسوب می شود که البته در نوع خود می تواند یک عنصر نهایی اولیه نیز باشد. این شیر مغناطیسی از طریق فرمان مستقلی که از نرم افزار کنترل کننده دریافت می کند قطع و وصل میشود. شیر همراه با گیج فشار (0-1 MPa) موجود در این بخش نقش یک عنصر نهایی ثانویه در بخش تامین حباب را ایفا می کند که بصورت دستی تنظیم می شود. در قسمت دیگر این بخش که در واقع قسمت میانی بخش تامین حباب محسوب می شود مجموعه موتور پله ای و گیربکس محرک و شیر مخصوص هوا همان عنصر نهایی است. حباب ساز ابزاری است که در نتیجه تنظیم و کنترل هوا، حباب با کیفیتهای مختلف تولید می کند و در واقع نمی توان آنرا جزو عناصر نهایی در این سیستم به حساب آورد. جهت اعمال تنظیمات و مشاهده تغییرات اعمال شده و در سلول نیاز به رابط یا واسطه گرافیکی است تا از طریق آن بتوان اعمال فوق را انجام داد [۳]. بدین منظور سیستم مانیتورینگ برای این سیستم طراحی شد (شکل ۷) که از طریق آن می توان موارد زیر را انجام داد:

۱- بطور دستی اقدام به روشن و یا خاموش کردن هر کدام از ابزار الکتریکی کرد.

۲- مشاهده تصویری شماتیکی سلول.

۳- مشاهده تغییرات مربوط به عمق کف، ارتفاع پالپ، ماندگی گاز، چگالی کف، چگالی پالپ و فشار هوا.



شکل ۷: سیستم مانیتورینگ سلول فلوتاسیون ستونی.

$$\rho_f = \frac{P_3}{H_3 \cdot g} \quad (6)$$

مشخص است که از حسگرهای تحتانی و میانی چگالی ناحیه جمع آوری و یا ( $\rho_c$ ) و از اطلاعات حاصل از حسگر فوقانی چگالی ناحیه کف ( $\rho_f$ ) بدست می آید. حال با جایگزین کردن مقادیر حاصل از دو رابطه شماره (۵) و (۶) در رابطه شماره (۴) می توان میزان ارتفاع عمق کف را بدست آورد و یا به بیان دیگر خواهیم داشت:

$$H_f = \frac{H_3 [H_1 (P_1 - P_2) - P_1 (H_1 - H_2)]}{H_3 (P_1 - P_2) - P_3 (H_1 - H_2)} \quad (7)$$

بنابراین همانطور که ملاحظه شد با توجه به مطالب فوق می توان با بکار بردن سه حسگر فشار عمق کف را تعیین کرد [۱]. میزان خطای این اندازه گیری نیز با انجام آزمایشات و مقایسه مقادیر واقعی و مقادیری که سیستم محاسبه و نشان می دهد بدست آمده است.

جاذبه است. همانطور که در شکل مشخص است دو عدد از حسگرها در ناحیه جمع آوری و یکی از آنها در ناحیه کف قرار دارد که با توجه به شکل و رابطه  $P = \rho \cdot g \cdot h$  خواهیم داشت:

$$P_1 = (H_1 - H_f) \cdot \rho_c \cdot g + H_f \cdot \rho_f \cdot g \quad (1)$$

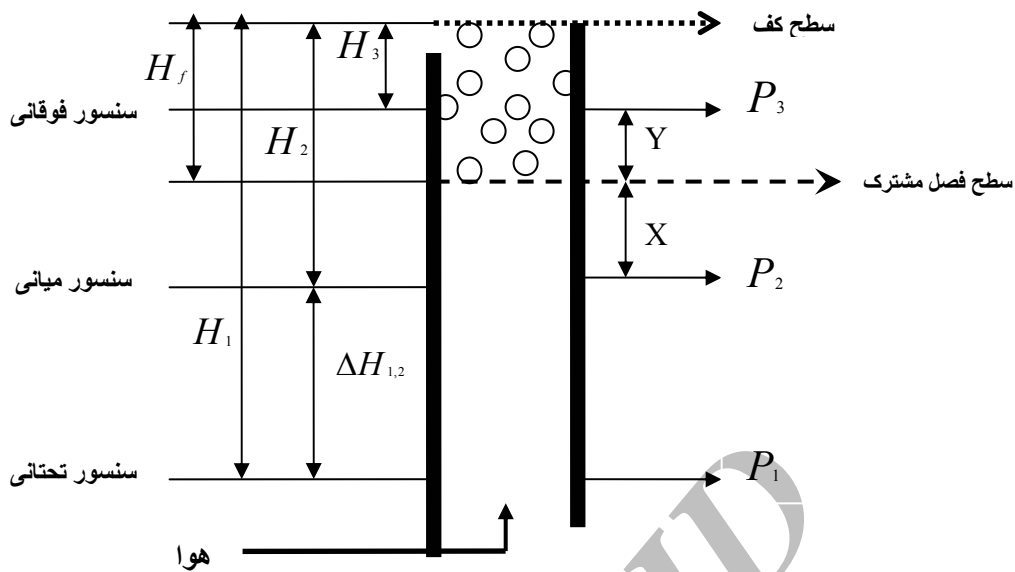
$$P_2 = (H_2 - H_f) \cdot \rho_c \cdot g + H_f \cdot \rho_f \cdot g \quad (2)$$

$$P_3 = H_3 \cdot \rho_f \cdot g \quad (3)$$

با توجه به معادلات فوق، روابط زیر برای چگالی کف و چگالی پالپ و در نهایت برای میزان بصورت پیوسته بدست خواهد آمد:

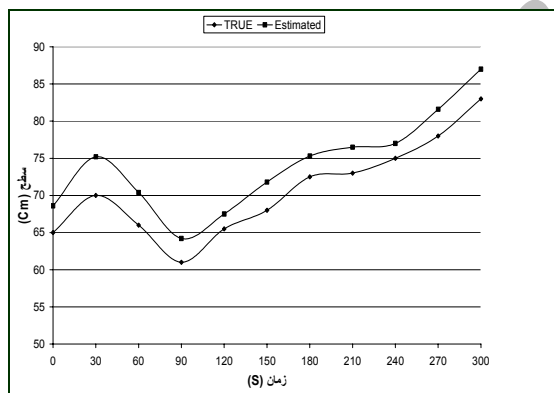
$$H_f = \frac{H_1 \cdot \rho_c \cdot g - P_1}{(\rho_c - \rho_f) \cdot g} \quad (4)$$

$$\rho_c = \frac{P_1 - P_2}{(H_1 - H_2) \cdot g} \quad (5)$$



شکل ۳: نمای شماتیک از سطح تراز ابزار نصب شده.

بنابراین همانطور که ملاحظه شد با توجه به مطالب فوق می توان با بکار بردن سه حسگر فشار عمق کف را تعیین کرد [۱]. میزان خطای این اندازه گیری نیز با انجام آزمایشات و مقایسه مقادیر واقعی و مقادیری که سیستم محاسبه و نشان می دهد بدست آمده است. بدین ترتیب نمودار مقایسه ای آمده در شکل (۹) برای مقایسه مقادیر واقعی و تخمین زده شده ارتفاع سطح مشترک بدست آمد. با توجه به مقادیر حاصل در زمانهای مختلف میتوان با استفاده از رابطه (۸) خطای این اندازه گیری را بدست آورد [۵].



شکل ۹: نمودار مقایسه ای مقادیر واقعی و محاسبه شده ارتفاع سطح مشترک.

لازم به تذکر است که جهت تخمین میزان ماندگی هوا از روش حسگرهای فشار استفاده شد که در عمل به علت پرشها و خطاهای بزرگی که در تخمین پیوسته در آن وجود داشت عملاً در اجرا کنترل اتوماتیک، سیستم را دچار مشکل کرده و باعث خروج سیستم از حالت پایداری می شود. بنابراین در نهایت علیرغم تلاشهای انجام شده از سیستم کنترلی خارج شد.

بنابراین همانطور که ملاحظه شد با توجه به مطالب فوق می توان با بکار بردن سه حسگر فشار عمق کف را تعیین کرد [۱]. میزان خطای این اندازه گیری نیز با انجام آزمایشات و مقایسه مقادیر واقعی و مقادیری که سیستم محاسبه و نشان می دهد بدست آمده است. بدین ترتیب نمودار مقایسه ای آمده در شکل (۹) برای مقایسه مقادیر واقعی و تخمین زده شده ارتفاع سطح مشترک بدست آمد. با توجه به مقادیر حاصل در زمانهای مختلف میتوان با استفاده از رابطه (۸) خطای این اندازه گیری را بدست آورد [۵].

$$e = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{x_i + y_i}$$

(۸)

دقت اندازه گیری و تخمین با ابزار و روش فوق بسیار بالا می باشد بطوریکه کلاس تخمین حدود ۰/۲ محاسبه شد [۶].

با استفاده از این رابطه که در آن  $e$  خطای اندازه گیری،  $n$  تعداد جفت‌های اندازه گیری شده و  $x_i, y_i$  هر کدام به ترتیب معرف اندازه واقعی و تخمین زده شده در هر جفت اندازه گیری می باشند، برابر ۵/۲۲٪ خواهد بود که مقدار قابل قبولی است. در واقع مقدار مطلوب باید با مقدار اندازه گیری شده در مقایسه کننده، مقایسه شود تا نسبت به اختلاف موجود عکس العمل سیستم طراحی گردد. بعد از انجام این مقایسه باید در جهت رفع این

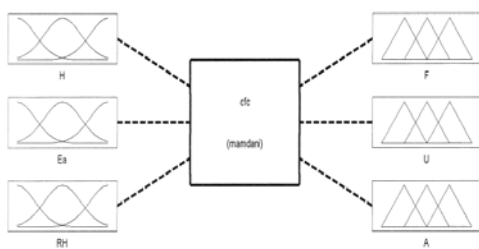
## کنترل فازی سلول فلوتاسیون ستونی

در بسیاری از مسائل مربوط به کنترل عملی (کنترل فرآیند صنعتی) و در اینجا کنترل سلول فلوتاسیون ستونی، یافتن یک مدل ریاضی مشخص و در عین حال دقیق بسیار مشکل و در بسیاری از موارد غیر ممکن است. با این وجود می توان با انجام آزمایشات مختلف و متعدد و بر اساس تجربیات و با استفاده از قدرت منطقی به یک راهکار عملی مفید برای کنترل نمودن فرآیند رسید که این تجربیات را میتوان با طراحی یک سیستم فازی، تحت قالب یک کنترل فازی در آورده و در عمل از آن استفاده کرد [۷، ۸، ۹، ۱۰]. کاملاً واضح است که در اینجا نه تنها یک رفتار خطی وجود ندارد، بلکه رفتار غیرخطی که سیستم از خود نشان می دهد نیز از یک رابطه مشخص کمی، پیروی نمی کند. در واقع روابط حاکم بر سیستم هم به لحاظ کیفی و هم به لحاظ کمی

اهمیت دارند ولی به علت ناشناخته بودن روابط کمی بین متغیرها و همچنین غیرقابل پیش بینی بودن تغییرات متغیرها و مقادیر دقیق حاصل شده برای آنها و در نتیجه ایجاد تغییرات در مقدار آنها، نمی توان از سیستمهای کنترلی عادی برای کنترل این سیستم استفاده کرد و باید سیستمهای فازی، که سیستم کنترلی انسانی (با استفاده از متغیرهای زبانی) را به زبان ریاضی در وجود خود نهفته دارد، بکار برد [۳، ۱۱]. بنابراین برای مدل سازی و طراحی سیستم فازی جهت کنترل این سیستم روابط کیفی موجود بین متغیرهای این سیستم از اهمیت زیادی برخوردار خواهد شد.

برای کنترل متغیر کنترلی عمق کف (H) از متغیرهای مدیریتی میزان ورودی خوراک (F)، میزان ته ریز سیستم (U) و نرخ تغییرات عمق کف (RH) و جهت کنترل متغیر کنترلی ماندگی هوا از میزان هوادهی (A) استفاده شده است و از این طریق در جهت تنظیم و پایداری سطح مشترک اقدام شده است. تفاوت کنترل فازی با منطقهای معمول کنترل این است که در واقع با استفاده از کنترل فازی می توان همان منطق و روش کنترلی یک اپراتور ساده برای کنترل یک سیستم را به زبان ریاضی در آورده و از آن استفاده کرد [۱۲]. در واقع اگر یک اپراتور بخواند سیستم موضوع این طرح (سلول فلوتاسیون ستونی) را کنترل نماید در صورت مشاهده تغییرات H نسبت به مقدار مشخص شده قبلی، طوری شیرهای مربوط به

ورودی خوراک و ته ریز را تغییر می دهد تا سیستم مجدداً به حالت تعادل برسد. این عمل کم، زیاد و متوسط در تنظیم کردن شیرها و کم و زیاد بودن مقادیر H و  $E_d$ ، متغیرها و حالتهای زبانی استفاده شده در این سیستم است. در واقع برای تمام متغیرهای کنترلی و مدیریتی که در سیستم و کنترل کننده فازی شرکت داده شده اند سه حالت کم، متوسط و زیاد در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰: نمایی کلی از سیستم فازی [۷].

برای متغیرهای کنترلی (ورودی) و مدیریتی (خروجی) بعد از اعمال تغییرات متعدد نتایج برای پارامترهای تابع عضویت متغیرهای کنترلی بصورت جدول ۱ است. در این جدول پارامترهای a، b و ... پارامترهای سیستم فازی می باشند. نتایجی که برای مقادیر پارامتری تابع عضویت متغیرهای مدیریتی نیز بدست آمده در جدول ۲ آورده شده است. به عنوان تابع عضویت از توابع گوسی برای متغیرهای کنترلی و مدیریتی استفاده شد (شکل ۱۱). قواعد فازی طراحی شده شامل روابط کیفی موجود بین متغیرهای کنترلی و متغیرهای مدیریتی ناشی از اندرکنشهای موجود بین آنها می باشد. این قوانین با استفاده از استنتاج ممدانی (یکی از روشهای استدلال فازی مستقیم) و قالب اگر - آنگاه نوشته شده اند. در این بین متغیر کنترلی RH جهت اعمال کنترلی هر چه ملایمتر بر ارتفاع فصل مشترک در سیستم و قوانین فازی وارد شده است.

همانطور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، در این طرح سعی بر تخمین و اندازه گیری مقدار ماندگی گاز و در نهایت استفاده از آن در کنترل کننده فازی بود که به علت عدم حصول نتایج مثبت در تخمین و کنترل، این متغیر از سیستم کنترلی اتوماتیک حذف شده و تحقیق و بررسی در یافتن راهی عملی و مثبت در جهت تخمین آن ادامه دارد. در نهایت می توان کل عملیات و معماری سیستم



کنترلی را در شکل (۱۲) خلاصه کرد.

پیریت انجام گرفت.

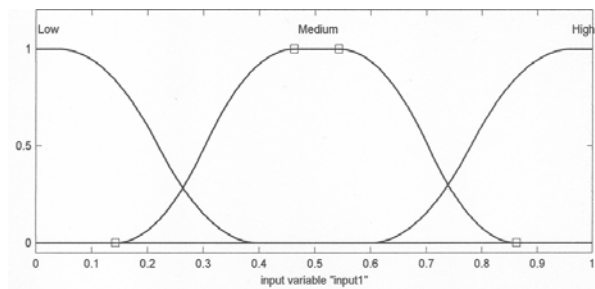
جدول ۱: مقادیر نرمال شده پارامترهای توابع عضویت متغیرهای کنترلی بکار رفته در این سیستم فازی.

پارامترها				ترمه‌های زبانی	متغیرها
a	b	c	d		
۰/۲	۰/۵			کم	عمق کف (H)
۰/۲	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۸	متوسط	
۰/۱۶	۰/۱۸			زیاد	
۰/۲	۰/۵			کم	ماندگی هوا
۰/۲	۰/۵	۰/۶	۰/۸	متوسط	
۰/۱۶	۰/۱۸			زیاد	
۰/۲۶	۰/۵			کم	نرخ تغییرات عمق کف (RH)
۰/۳۵	۰/۵	۰/۵	۰/۶۵	متوسط	
۰/۵	۰/۷۵			زیاد	

جدول ۲: مقادیر نرمال شده پارامترهای توابع عضویت متغیرهای مدیریتی بکار رفته در این سیستم فازی.

پارامترها				ترمه‌های زبانی	متغیرها
a	b	c	d		
					ورودی (F)
۰/۰۵	۰/۴۵			کم	
۰/۲	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۸	متوسط	
۰/۵۵	۰/۹۵			زیاد	
					ته ریز (U)
۰	۰/۵			کم	
۰/۲	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۸	متوسط	
۰/۵	۱			زیاد	
					مقدار هوا (A)
۰	۰/۵			کم	
۰/۳	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۷	متوسط	
۰/۵	۱			زیاد	

در آزمایش اول، ستون بدون استفاده از سیستم اتوماتیک و صرفاً توسط اپراتور بکار گرفته شد. در این حالت سعی گردید تا با تغییر مقدار پالپ ورودی و خروجی (ته ریز)، ارتفاع ناحیه جمع آوری (H) در حد مطلوب ثابت شود و در نتیجه سیستم پایدار گردد. در این آزمایش H معادل ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد و سپس با استفاده از مشاهده، اقدام به تشخیص عمق کف گردید. فشار هوا ثابت و برابر ۴۰ psi و شیر کنترل دبی هوا در حد ۵٪ باز قرار داشت. بدیهی است محدودیت عمل اپراتور از نظر دقت و سرعت، کنترل سلول را با مشکلات جدی مواجه نمود. در آزمایش بعد سیستم فازی جهت کنترل ستون بکار گرفته شد. ارتفاع ناحیه جمع آوری، فشار هوا و میزان هوادهی مطابق حالت قبل بود ولی با استفاده از کنترل خودکار ثابت نگداشته شد. در آزمایش سوم آب شستشو با دبی ۰/۵۳ لیتر بر ثانیه به کنسانتره پاشیده شد. سایر پارامترها ثابت نگهداشته شدند. هر آزمایش به دفعات متعدد (حداقل ۵ بار) تکرار گردید تا از صحت نتایج اطمینان حاصل شود. مقادیر متوسط نتایج در جدول (۳)



شکل ۱۱: نمونه ای از توابع عضویت برای متغیرهای کنترلی و مدیریتی [۷].

## مطالعه موردی

جهت بررسی نحوه عملکرد سلول ستونی مورد نظر چند آزمایش با استفاده از کانسنگ مس سولفور معدن چهل کوره یزد انجام گرفت. کانیهای اصلی موجود در این کانسنگ عبارت بودند از کالکوپیریت (۱/۴٪) بهمراه مقادیر قابل توجهی از پیریت و نیز گالن، اسفالریت و گانگ سیلیکاته. کلیه آزمایشها با استفاده از پالپ حاوی ۲۰٪ وزنی جامد، آمیل گزنات پتاسیم بعنوان کلکتور کالکوپیریت، Aerofroth 65 بعنوان کف ساز و سود، بعنوان تنظیم کننده pH در حد ۱۰/۵ جهت بازداشت

آمده است.

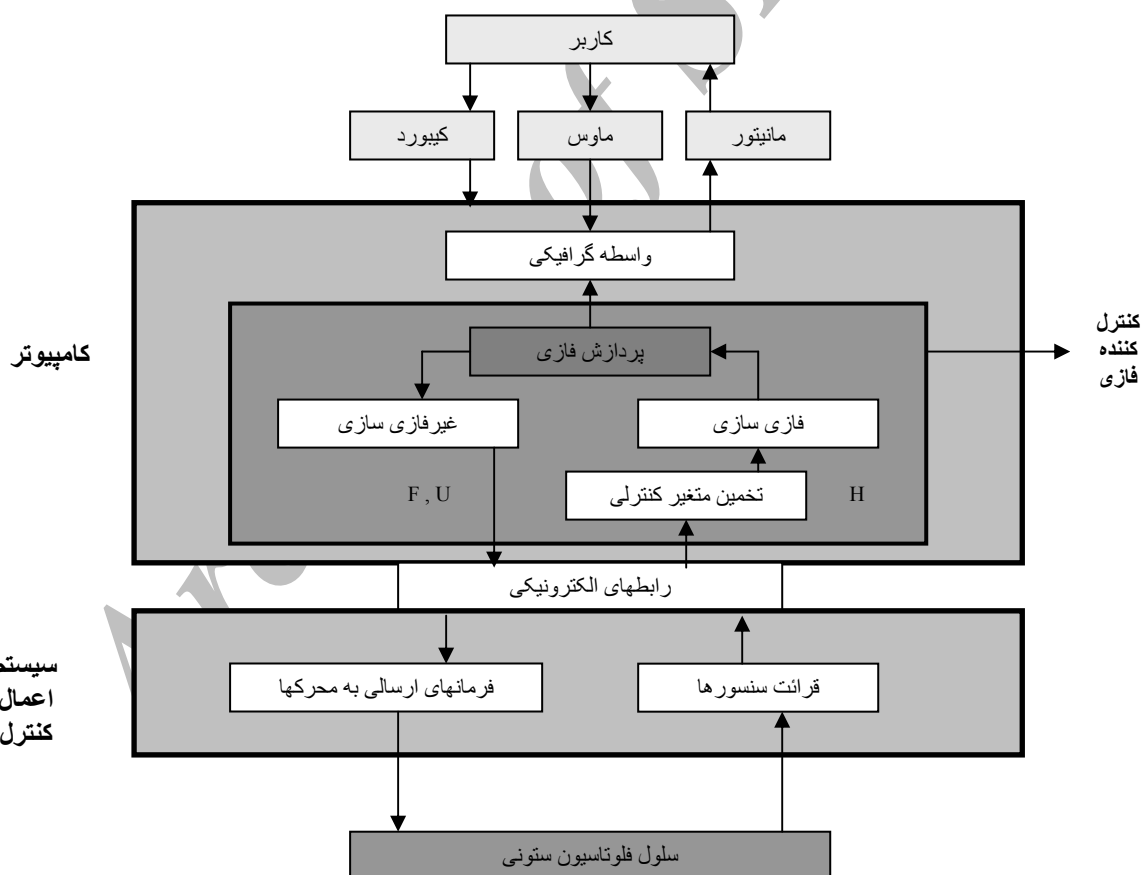
## بحث و نتیجه گیری

سلول ستونی آزمایشگاهی با مجهز شدن به سه حسگر فشار دیافراگمی دقیق می تواند در هر لحظه عمق کف (سطح مشترک دو ناحیه مشخصه سلول) را اندازه گیری کند که این مهم از طریق رابطهای الکترونیکی جهت انتقال، فیلتر و تقویت داده های حاصل از حسگرها و روابط موجود در نرم افزار کنترل کننده انجام می پذیرد. این سلول با مجهز شدن به پمپهای پرستالتیک مشکل کلاگ (Clog) شدن پمپهای عادی به علت وجود ذرات جامد در سیال پمپ شده (پالپ) را با توجه به خصوصیات ویژه خود مرتفع کرده است.

جدول ۳: نتایج آزمایشات بر روی سنگ سولفور مس.

آزمایش	پارامتر		
	عبارت مس سرریز (%)	عبارت مس ریز (%)	ضریب پرعیار سازی
۱	۴/۳۲	۰/۵۷	۴/۵۲
۲	۶/۳۹	۰/۳۵	۵/۷۵
۳	۷/۶۹	۰/۲۶	۶/۵۲

با توجه به جدول (۳) برتری کنترل خودکار بر کنترل دستی و نیز بکارگیری آب شستشو جهت دستیابی به کنسانتره با عیار بالاتر مشخص می شود.



شکل ۱۳: معماری سیستم کنترل سلول فلوتاسیون ستونی.

از طریق رابط گرافیکی که بر روی صفحه مانیتور در اختیار اپراتور قرار دارد انجام می شود. سیستم مذکور با دارا بودن پردازشگر Pentium II قادر به

برای هدایت و کنترل آسان تر سیستم نیاز به اعمال تغییرات در مقدار پمپاژ پمپهای پرستالتیک است که این مهم از طریق الکتروموتورها و کنترل کننده دور موتور<sup>۵</sup> و

عیار کنسانتره، باطله و نیز راندمان از نتایج آزمایشات انجام شده (آزمایش دوم و سوم) در حالت استفاده از آب شستشو و عدم وجود آن ملاحظه می شود که حضور آب شستشو می تواند تا ۱۳/۳۹٪ در بالا بردن عیار و تا ۶/۲۱٪ در بالا بردن راندمان موثر باشد. بنابراین با توجه به اعداد فوق می توان به راحتی وجود آب شستشو را مهم ارزیابی کرد.

نتیجه مهم دیگری که در نتیجه اجرا این طرح حاصل شد عدم حصول نتیجه مثبت از بکارگیری روش سنسورهای سه گانه فشار (به علت ایجاد نوسانات و پرشهای بسیار در هنگام تخمین پیوسته که منجر به ایجاد اختلالات فراوان در به تعادل رسیدن سلول می شد) در تخمین پیوسته میزان ماندگی هوای سلول بود. بدین ترتیب روش اختلاف فشار (سنسورهای سه گانه دیافراگمی فشار) تنها در مورد تخمین و اندازه گیری پیوسته سطح مشترک نتیجه مثبت داشته و در مورد ماندگی هوا نتیجه کاربردی در بر نداشت.

### تقدیر و تشکر

از آنجائیکه اجرای این طرح با مساعدت مالی قطب علمی گروه مهندسی معدن میسر شد، لازم است از حمایت‌های سرپرستان محترم پیشین و فعلی این قطب و نیز کارکنان آن سپاسگزاری گردد. همچنین از زحمات جناب آقای مهندس علی قربانی کارشناس آزمایشگاه کانه آرایبی گروه مهندسی معدن دانشکده فنی کمال تشکر به عمل می آید.

انجام یک نمونه گیری داده در هر ثانیه است. بطوریکه در هر ثانیه سیستم اطلاعات جدید شده در اختیار نرم افزار قرار میدهد و در نتیجه نرم افزار نیز قادر به استخراج فرمان برای عملگرها در هر ثانیه خواهد بود.

دوشهای آب شستشوی این سلول نیز از دو عنصر تشکیل شده است که یکی از آنها درون لوله ستون قرار می گیرد و در واقع آب شستشوی اصلی سیستم می باشد و دیگری نیز دوشی است که کف خارج شده از ستون را شسته و به ظرف مخصوص خود هدایت می کند. سیستم مانیتورینگ و یا رابط گرافیکی سیستم به گونه ای تنظیم گردیده که در هر لحظه بتوان مقادیر مربوط به چگالی پالپ، چگالی کف، ارتفاع سطح مشترک و یا عمق کف را مشاهده کرد. با استفاده از این رابط می توان مقادیر مربوط به پمپاژ ورودی خوراک و ته ریز سیستم را به صورت دستی نیز تنظیم کرد. هرکدام از عملگرها را به تنهایی می توان با بکار بردن این رابط گرافیکی روشن و خاموش کرد.

با آزمایشات انجام گرفته مشاهده شد که با بکار بردن کنترل کننده فازی جهت کنترل سیستم تا چه اندازه می توان در بالا بردن راندمان کارکرد سلول و افزایش عیار قدم برداشت بطوریکه با مشاهده نتایج حاصل از آزمایشات اول و دوم می توان نتیجه گرفت که با بکار بردن کنترل کننده فازی تا ۲۷/۲۱٪ در افزایش عیار و ۱۶/۲۸٪ در افزایش راندمان اقدام شده است.

نتیجه بسیار مهم دیگری که در نتیجه انجام آزمایشات بر روی ماده معدنی حاصل شد مبین این مطلب است که آب شستشو می تواند در بالا بردن عیار کنسانتره نقش داشته باشد. با انجام مقایسه بر روی مقادیر حاصل برای

### مراجع

- 1 - Finch, J. A. and Dobby, G. S. (1990). *Column Flotation*. Pergamon Press.
- 2 - Carvalho, M. T. and Durao, F. (2002). *Control of Column Flotation Using Fuzzy Logic Inference*, Elsevier.
- 3 - Washnigتن، چری. "کنترل صنعتی". ترجمه، انتشارات پرتو دانش، (۱۳۷۵).
- 3 - Bouchard, J., Viilar, R. and Desbiens, A. (2001). *On-Line Bias & Froth Depth Measurement In Flotation Columns*, Laval University Publishing.
- ۵ - حسنی پاک، ع. ا. و شرف الدین، م. "تحلیل داده های اکتشافی". انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۸۰).
- ۶ - روستایی، ح. "اصول اندازه گیری الکتریکی". انتشارات دیباگران تهران، (۱۳۸۰).
- 7 - Fuzzy Systems Institute, (2001). *Fuzzy Logic In Knowledge Builder*, FSI.
- 8 - International Fuzzy System Association, (1996), *A Tutorial Of Fuzzy Systems*, IFSA.

- ۹ - طاهری، م. " آشنایی با نظریه مجموعه های فازی." انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، (۱۳۷۸).
- ۱۰ - برزویی، رج. "مباحثی در نظریه مجموعه های فازی." انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان، (۱۳۸۱).
- ۱۱ - کازو تاناکا. "مقدمه ای بر منطق فازی برای کاربردهای عملی آن." ترجمه، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۱).
- ۱۲ - وانگ، لی. "سیستمهای فازی و کنترل فازی." ترجمه، انتشارات حامی، (۱۳۸۱).

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Collection Zone
- 2 - Froth Zone
- 3 - Bubbly Flow regime
- 4 - Turbulent Regime
- 5 - Invertor

Archive of SID