نحوه کنترل سطح در سلول فلوتاسیون ستونی کارخانه نیمه صنعتی مجتمع مس سرچشمه

محسن یحیایی[۱*] و صمد بنیسی[۲]

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی ـ کارخانه زغالشویی شرکت اینترکربن

۲- دانشیار بخش مهندسی معدن ـ دانشگاه شهید باهنر کرمان

E-mail: yahyaei@hemmatgroup.com - banisi@mail.uk.ac.ir

چکیده

کنترل خودکار با رشد کمی و کیفی صنایع مختلف، رشد چشمگیری داشته است. کنترل خودکار که بخش مهم و ناگسستنی از فرآیند های صنعتی امروز است، در صنعت فرآوری مواد معدنی نیز، علیرغم پیچیدگی های موجود، در مراحل مختلف از جمله فلوتاسیون، کاربرد دارد. استفاده از سیستم کنترل در مرحله فلوتاسیون، در بالابردن کارآیی این بخش و جلوگیری از اتلاف مواد معدنی باارزش، مواد شیمیایی و انرژی، تاثیر قابل توجهی دارد. سلول فلوتاسیون ستونی که در سال های اخیر جایگزین سلول های فلوتاسیون مکانیکی شده است، از جهت بکارگیری شیوه های کنترل اتوماتیک، شرایط مناسب تری دارد. به منظور امکان سنجی استفاده از سلول ستونی در کارخانه پرعیارکنی مجتمع مس سرچشمه، در سال ۱۳۷۸، یک سلول ستونی در مقیاس نیمه صنعتی، به قطر ۲۶ cm و طول ۵۵۰ cm، طراحی و ساخته شد و در کارخانه پرعیارکنی نیمه صنعتی نصب گردید. برای تعیین موقعیت سطح مشترک پالپ و کف، از میله هدایت سنج به طول و قطر ۱۸۰ cm و ۱/۵ cm، استفاده شد و مقدار مطلوب (Setpoint) با تنظیم دبی باطله سلول توسط پمپ دور متغیر انجام گردید. با توجه به شیوه کنترلی استفاده شده، تابع انتقال فرآیند تنظیم سطح در سلول و حلقه بسته کنترل پسخور (Feedback)تعیین شد و برای تنظیم پارامترهای تابع کنترل، آزمایش تنظیم کنترل کننده انجام گردید. با انجام آزمایش تنظیم کنترل کننده، برای حالتی که از کنترل تناسبی-انتگرالی و مشتقی استفاده شود، بهره کنترل تناسبی(K_p)، ۰/۲۲، زمان انتگرال(T_i)، ۳۷/۵ ثانیه و زمان مشتق(T_d)، ۹/۴ ثانیه بدست آمد. آزمایش های انجام شده در سیستم دو فازی آب/هوا، نشان داد که این شیوه کنترل سلول از دقت خوبی برخوردار است.

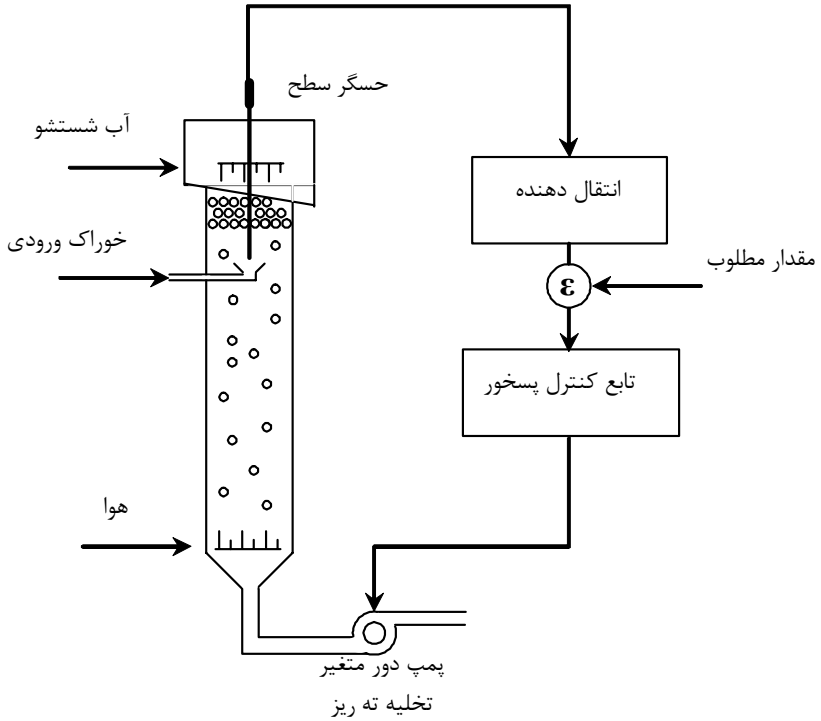
واژه‌های کلیدی: کنترل سطح، کنترل PID، سلول فلوتاسیون ستونی

[*] کرمان ـ شهرستان زرند ـ کارخانه زغالشویی شرکت اینترکربن ـ تلفن: ۰۹۱۲۱۴۶۴۱۴۳

مقدمه

کنترل یک سیستم در مفهوم کلی، به این معنا است که یک کمیت مورد نظر در یک سیستم یا مکانیزم یا ماشین، در مقدار معینی باقی مانده و یا طبق روال مطلوب و مورد نظر تغییر یابد[۱] و یک شیوه کنترلی، عملی است که می‌کوشد تا در حضور اغتشاش، اختلاف بین خروجی سیستم (مقدار متغیر تحت کنترل) و مقدار مطلوب را کمینه کند و این کوشش بر اساس مقدار اختلاف صورت می‌گیرد.

شیوه بکارگرفته شده در این تحقیق، کنترل پایدارساز بوده که معمولا به دو روش سیستم کنترل پسخور و سیستم کنترل پیشخور انجام می‌شود. در سیستم پسخور که معمول تر و ساده تر است، یک حسگر و انتقال دهنده، مقدار واقعی متغیر تحت کنترل را اندازه گیری می‌کند و یک سیگنال به کنترل کننده پسخور می‌فرستد تا این سیگنال با مقدار مطلوب مقایسه گردد. تابع کنترل کننده نیز یک سیگنال مناسب با مقدار خطا تولید می‌کند تا مقدار متغیر تاثیرپذیر را طوری تنظیم کند که تفاوت بین مقدار واقعی و مقدار مطلوب متغیر تحت کنترل، کاهش یابد.شکل۱، عوامل موثر برکنترل سطح را در سلول ستونی نشان می‌دهد.



شکل ۱- متغیرهای موثر بر کنترل سطح در سلول ستونی

تعیین تابع انتقال سیستم

رفتار دینامیکی بسیاری از سیستم ها، اعم از سیستم های مکانیکی، الکتریکی، اقتصادی و غیره را می‌توان با استفاده از معادلات دیفرانسیل بیان کرد. این معادلات، با توجه به روابط حاکم بر سیستم بدست می‌آیند. برای تعیین رابطه خروجی و ورودی توسط معادلات دیفرانسیل خطی مستقل از زمان، از توابعی به نام توابع انتقال استفاده می‌شود. تابع انتقال، طبق تعریف، نسبت تبدیل لاپلاس خروجی(تابع تغییرات متغیر تحت کنترل) به تبدیل لاپلاس ورودی(تابع تغییرات متغیر اثرگذار) است، به شرطی که تمام شرایط اولیه صفر باشد[۲]. با استفاده از مفهوم تابع انتقال، می‌توان رفتار دینامیکی سیستم را با معادلات جبری بر حسب s، توصیف کرد.

در تحلیل سیستم های مربوط به جریان سیال، سیستم‌هایی که دارای جریان لایه‌ای می‌باشند را می‌توان با معادلات دیفرانسیل خطی توصیف کرد. شمای کلی کنترل سطح در سلول فلوتاسیون ستونی با کمک یک پمپ دور متغیر، به صورت ساده در شکل ۲، نشان داده شده است.

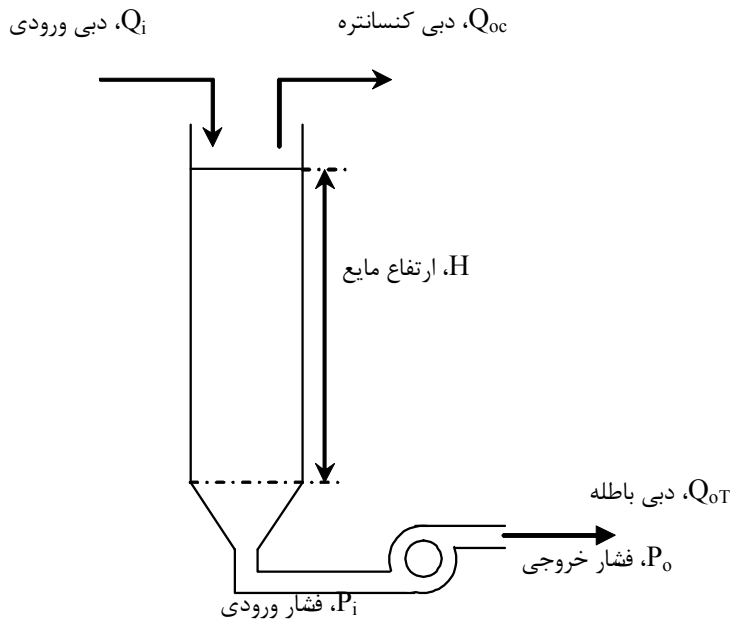
عوامل موثر بر کنترل سطح را می توان به این ترتیب نام برد:

۱- دبی خوراک ورودی که رابطه آن با ارتفاع فاز مایع، رابطه مستقیم است.

۲- دبی کنسانتره خروجی که رابطه آن با ارتفاع فاز مایع، رابطه عکس است.

۳- دبی باطله خروجی که رابطه آن نیز با ارتفاع فاز مایع، رابطه عکس می‌باشد. دبی خروجی پمپ (از نوع گریز از مرکز) خود به دو عامل اختلاف فشار ورودی با خروجی و دور موتور بستگی دارد.

با توجه به کم بودن مقدار دبی کنسانتره (کمتر از ۲۰٪ کل دبی)، نسبت به دبی خوراک ورودی و دبی باطله، برای ساده کردن محاسبات از آن به عنوان خطا صرف نظر می‌شود.



شکل ۲- کنترل سطح در سلول فلوتاسیون ستونی توسط موتور دور متغیر

تغییرات ارتفاع در واحد زمان به صورت زیر می باشد:

ورودی - خروجی = نرخ تغییرات

$$Q_i - Q_{OT} = \frac{dV}{dt} = A\frac{dH}{dt} \qquad (۱)$$

که در آن V، حجم فاز مایع، H، ارتفاع فاز مایع و A، سطح مقطع سلول می‌باشد.

همانطور که گفته شد، دبی خروجی به دور موتور و اختلاف فشار بین ورودی و خروجی پمپ وابسته است. لذا مقدار دبی خروجی با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_{OT} = Q_{OTS} + (N - N_s)\frac{Q_{OT}}{N} + (P - P_s)\frac{Q_{OT}}{P} \qquad (۲)$$

که در آن N، دور موتور و P، اختلاف فشار بین ورودی و خروجی پمپ می‌باشد. اندیس (s)، مربوط به مقدار متغیر در حالت تعادل می‌باشد.

اگر این طور تعریف شود که:

$$\gamma = \frac{Q_{OT}}{N}\Big|_{N_s, P_s}; n = N - N_s \qquad (۳\text{-الف})$$

$$\beta = \frac{Q_{OT}}{P}\Big|_{P_s,N_s} ; p = P - P_s \qquad (۳-ب)$$

آنگاه رابطه ۲ به شکل زیر در می‌آید:

$$Q_{OT} = Q_{OTS} + \gamma n + \beta p \qquad (۴)$$

و با کم کردن Q_{OTS}، از دو طرف رابطه ۱ داریم:

$$Q_i - Q_{OTS} = Q_{OT} - Q_{OTS} + A\frac{dH}{dt} \qquad (۵)$$

با فرض این که:

$$q_i = Q_i - Q_{OTS} \qquad (۶)$$

و با توجه به رابطه ۴، از رابطه ۵، معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$q_i = \gamma n + \beta p + A\frac{dH}{dt} \qquad (۷)$$

با توجه به این که فشار خروجی پمپ به دلیل ثابت بودن ارتفاع دهانه خروجی، ثابت است، لذا تغییرات اختلاف فشار بین خروجی و ورودی پمپ طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$p = \rho g(H - H_s) \qquad (۸)$$

و با فرض:

$$h = H - H_s \qquad (۹)$$

معادله ۷ به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$q_i = \gamma n + \beta\rho g\Delta H + A\frac{dH}{dt} \qquad (۱۰)$$

و با تبدیل لاپلاس، نتیجه می‌شود:

$$q_i(s) = \gamma n(s) + \beta\rho g h(s) + Ash(s) \qquad (۱۱)$$

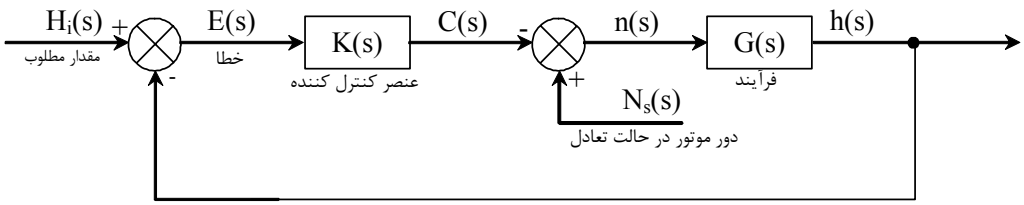
تابع تبدیل سیستم به شکل زیر به‌دست می‌آید:

$$h(s) = \frac{q_i(s) - \gamma n(s)}{\alpha + As} \qquad (۱۲)$$

که در آن، $\alpha = \beta\rho g$، می باشد.در رابطه ۱۲ به دلیل اینکه مقدار دبی خوراک ورودی به سلول توسط سیستم کنترل اندازه گیری نمی‌شود، مقدار $q_i(s)$، به عنوان ورودی اغتشاش در نظر گرفته شده و از محاسبات حذف می‌شود. به این ترتیب تابع تبدیل برای دور موتور، به این صورت بدست می‌آید:

$$G(s) = \frac{h(s)}{n(s)} = \frac{-\gamma}{\alpha + As} \qquad (۱۳)$$

نمودار بلوکی حلقه بسته کنترل کننده سطح در سلول ستونی، مطابق شکل ۳ می‌باشد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سیستم حلقه بسته، دارای دو ورودی است. (مقدار مطلوب ارتفاع و دور موتور در حالت تعادل) وقتی یک سیستم خطی دو ورودی دارد، می‌توان هر ورودی را به طور جدا و مستقل از دیگری بررسی کرده و خروجی‌های متناظر با تک تک ورودی‌ها را باهم جمع کرد تا پاسخ کامل بدست آید.



شکل ۳- سیستم حلقه بسته کنترل کننده سطح در سلول ستونی

هنگام بررسی اثر ورودی $N_s(s)$، فرض می‌شود سیستم در ابتدا در حالت تعادل بوده و خطا صفر است. بنابراین پاسخ $h_1(s)$، به ورودی $N_s(s)$، به صورت زیر است:

$$\frac{h_1(s)}{N_s(s)} = \frac{G(s)}{1 + K(s).G(s)} \qquad (۱۴)$$

همچنین هنگام در نظر گرفتن ورودی مرجع، $H_i(s)$، مقدار ورودی $N_s(s)$، صفر در نظر گرفته می‌شود. پاسخ $h_2(s)$، به ورودی مرجع، برابر است با:

$$\frac{h_2(s)}{n_s(s)} = \frac{K(s).G(s)}{1 + K(s).G(s)} \qquad (۱۵)$$

در حالتی که هر دو ورودی به طور همزمان اعمال شوند، پاسخ سیستم برابر جمع دو پاسخ است:

$$h(s) = G(s).\frac{N_s(s) + K(s).H_i(s)}{1 + K(s).G(s)} \qquad (۱۶)$$

طراحی کنترل کننده

در تحلیل سیستم های کنترلی در عمل، سیگنال ورودی به سیستم از قبل معلوم نیست و طبیعتی تصادفی دارد. تنها در بعضی حالت های خاص، سیگنال ورودی از قبل معلوم می‌باشد. در تحلیل و طراحی سیستم های کنترلی، باید سیگنال های آزمون مشخصی را وارد سیستم کرد و پاسخ را به این سیگنال‌ها بررسی کرد. سیگنال‌های آزمونی که معمولا بکار می‌روند، عبارتند از: تابع پله‌ای، تابع شیب، تابع شتاب، تابع ضربه، تابع سینوسی و توابع مشابه آنها.

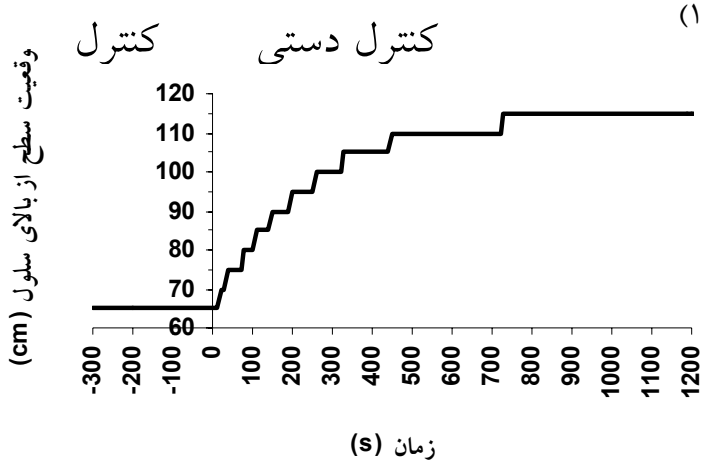
انتخاب سیگنال جهت آزمون، با توجه به ورودی‌هایی که در شرایط معمول سیستم به آن وارد می‌شوند، تعیین می‌گردد. تابع پله‌ای برای سیستم‌هایی که در معرض آشفتگی‌های ناگهانی قرار دارند، سیگنال آزمون خوبی است. برای تعیین ضرایب مربوط به حالت‌های کنترلی (تناسبی، انتگرالی و مشتقی)، آزمون تنظیم کنترل کننده برای سیستم کنترل سلول ستونی طی مراحل زیر انجام شد:

۱- دبی ورودی به سلول ستونی روی یک مقدار ثابت تنظیم گردید تا سیستم کنترل اتوماتیک سلول، سطح را روی ارتفاع ۶۵ cm تنظیم کند.

۲- کنترل کننده در وضعیت دستی قرار داده شد و دور موتور از ۱۱۰۰ دور در دقیقه به ۱۲۲۰ دور در دقیقه تغییر داده شد.

۳- تغییرات سطح در سلول در طول زمان ثبت گردید.

با انجام آزمون تنظیم کنترل کننده، که نتیجه آن در شکل ۴ نشان داده شده است، از قواعد تنظیم Ziegler و Nichols [۵]، برای پاسخ به سیگنال پله استفاده شد و ضرایب حالت های کنترلی تعیین گردید.(جدول ۱)



شکل ۴- پاسخ سیستم سلول فلوتاسیون ستونی به تابع پله‌ای تغییر دور موتور

(تغییر دور موتور از ۱۱۰۰ دور در دقیقه به ۱۲۲۰)

تابع تبدیل کنترل کننده که ضرایب حالت‌های مختلف کنترلی در آن استفاده می‌شوند، به صورت زیر است:

$$K(s) = K_p(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d) \qquad (۱۷)$$

که در آن،K_P ضریب تناسبی، T_i، زمان انتگرال و T_d، زمان مشتق است.

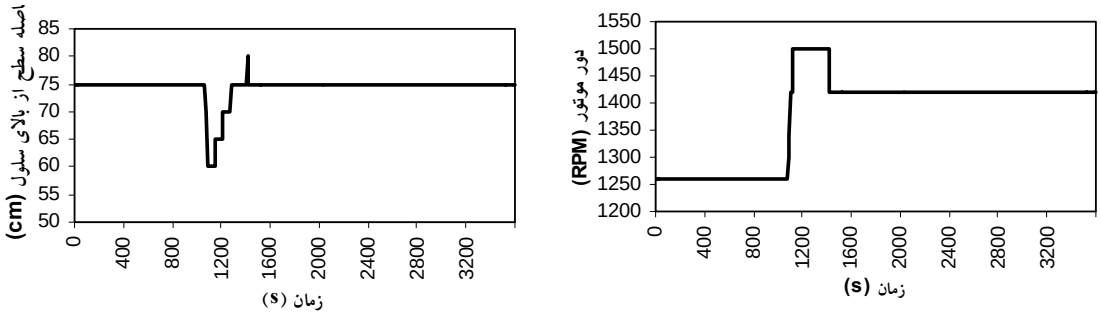
جدول ۱- ضرایب تابع کنترل بدست آمده، از قواعد Ziegler و Nichols

نوع کنترل کننده	ضریب تناسبی K_P	زمان انتگرال T_i (ثانیه)	زمان مشتق T_d (ثانیه)
تناسبی، P	۰/۲		۰
تناسبی – انتگرالی، PI	۰/۱۶	۵۶/۳	۰
تناسبی – انتگرالی – مشتقی، PID	۰/۲۲	۳۷/۵	۹/۴

نتایج آزمایش های سیستم کنترل

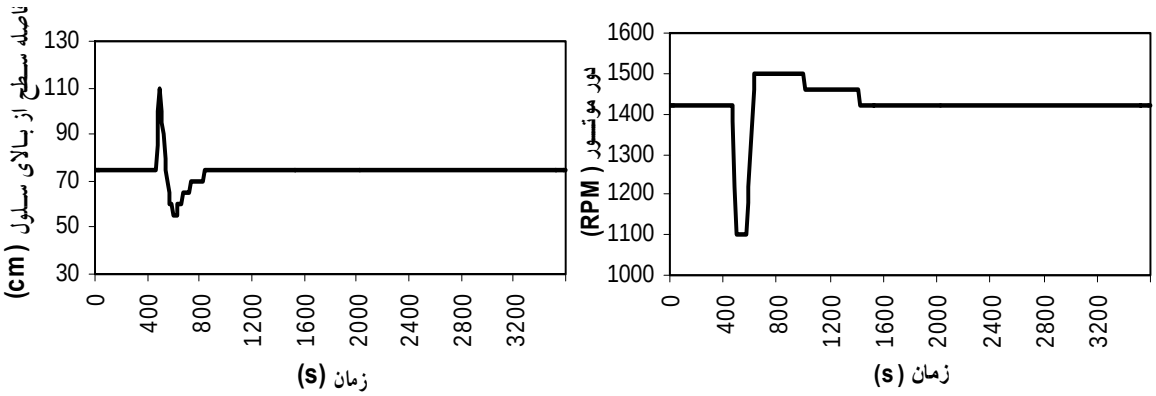
برای بررسی نحوه عملکرد اجزا سیستم کنترل و نرم افزار طراحی شده با تابع کنترل بدست آمده، آزمایش‌هایی در سیستم دو فازی آب/هوا انجام شد.

شکل ۵، عملکرد سیستم کنترل را وقتی دبی ورودی به سلول بطور پله‌ای افزایش یافته است، نشان می‌دهد. دراین آزمایش همانطورکه مشاهده می‌شود، موتور پمپ با تغییرات کمی به حالت بهینه رسیده است. در عین حال زمان بازگشت به حالت تعادل نیز کوتاه می‌باشد.



شکل ۵- پاسخ سیستم کنترل اتوماتیک به افزایش پله ای در دبی ورودی

شکل ۶ نیز، عکس العمل سیستم کنترل اتوماتیک را در مقابل ورودی ضربه نشان می‌دهد. در این آزمایش، دبی ورودی به سلول بطور ضربه‌ای کاهش داده شده و مجددا به حالت اول برگردانده شده است.



شکل ۶- پاسخ سیستم کنترل اتوماتیک به تغییر ضربه ای در دبی ورودی

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، کاهش ناگهانی در دبی ورودی به سلول، باعث افزایش فاصله سطح مشترک از بالای سلول گردیده است. در نتیجه سیستم کنترل اتوماتیک دور موتور را کاهش داده است تا سطح را به موقعیت قبلی بازگرداند. چون دبی ورودی به سلول مجددا به وضعیت قبلی خود برگشته است، در نهایت دور موتور نیز به وضعیت قبلی خود رسیده و سطح در حالت تعادل قرار گرفته است.

نتیجه گیری

۱- تابع انتقال فرآیند تنظیم سطح با استفاده از پمپ تخلیه ته ریز دور متغیر و سیستم کنترل حلقه بسته پسخور، برای سلول فلوتاسیون ستونی کارخانه نیمه صنعتی مجتمع مس سرچشمه تعیین گردید.

۲- نحوه عملکرد سیستم کنترل و پاسخ های آن به تغییرات ورودی سلول، با انجام آزمایش هایی در سیستم دو فازی آب/هوا، مورد ارزیابی قرار گرفت.

تشکر و قدردانی

از مدیر محترم امور تحقیقات و مطالعات شرکت ملی صنایع مس ایران و کارکنان محترم کارخانه نیمه صنعتی تغلیظ که شرایط و امکانات انجام آزمایش های لازم را فراهم نمودند تشکر نموده و از خداوند توفیق روزافزون آنها را خواستاریم.

منابع

۱-نیک آذر، منوچهر، "مبانی کنترل فرآیند در مهندسی شیمی"، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ۱۳۷۷

۲-اوگاتا، کاتسو هیکو، مترجم: محمود دیانی، " مهندسی کنترل"، انتشارات نص، تهران، ۱۳۷۷

۳-کاگ ناور، دونالد ری، مترجم: ایرج گودرزنیا، "کنترل فرآیندها"، مرکز نشر دانشگاهی، تهران،۱۳۷۹

٤- Finch, J.A. and G. S., Dobby, "Column flotation", Pergamon press, New York, ۱۹۹۰

٥- Gordon Lewis, M. ," Basic consepts, Terminology and Techniques for Process Control", Chemical Engineering, May ۳۰, ۱۹۸۳, P ۳-۱۱

٦- Moys, M. and J.A. Finch,"The measurement and control of level in flotation columns", in Column Flotation '۸۸, CK.V.C Sastry, SME Annual meeting Phoenix, Arizona,۱۹۸۸, P ۱۰۳-۱۱۲