بررسی رفتار دینامیکی و کنترلی سیستم‌های فرایندی ذره‌ای

امیر حیدری، منصور شیروانی*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

پیام‌نگار: **shirvani.m@iust.ac.ir**

چکیده

سیستم‌های ذره‌ای از جمله سیستم‌های رایج در صنایع شیمیایی و زیر مجموعه‌ای از سیستم‌های توزیع شده شبه گویا[1] می‌باشند به نحوی که در حدود ۶۰ درصد از صنایع شیمیایی با فرایندهای ذره‌ای مرتبط‌اند. در اینگونه سیستم‌ها هدف، تولید محصولی با دانه‌بندی معین و اندازه مشخصی از ذرات در محصول نهایی است. این امر سبب شده است که مسئله کنترل این‌گونه سیستم‌ها به منظور دستیابی به توزیع دانه‌بندی مطلوب، جزو چالش‌های بزرگ در زمینه کنترل فرایند، در عرصه مهندسی شیمی باشد. در این میان، آنچه که مهم است شناخت رفتار این دسته از سیستم‌ها و ارائه راهکاری مناسب در عرصه کنترل سیستم‌های ذره‌ای است. خصوصیات دینامیکی، معادلات بسیار پیچیده ریاضی حاکم بر اینگونه فرایندها، رفتار کاملاً ناخطی دینامیکی و عدم کنترل مطلوب توسط روش‌های معمول کنترلی، تحقیقات وسیعی را در زمینه کنترل و شناخت ساختار این دسته از فرایندها می‌طلبد.

در این تحقیق با بررسی روش‌های ارائه شده در زمینه دینامیک سیستم‌های ذره‌ای و همچنین راهکارهای ارائه شده در زمینه کنترل این دسته از فرایندها سعی شده است که مقایسه‌ای از نتایج حاصله از این تحقیقات در این زمینه صورت پذیرد و با توجه به این نتایج، راهکارهای نوین در زمینه کنترل این دسته از سیستم‌ها ارائه و پیشنهاد شود.

کلمات کلیدی: سیستم ذره‌ای، سیستم توزیع شدهٔ شبه گویا ،کنترل ناخطی

۱ـ مقدمه

در این بررسی، رفتار دینامیکی و کنترلی فرایندهای ذره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. این دسته از فرایندها زیر مجموعه سیستم‌های توزیع شدهٔ شبه گویا می‌باشند. سیستم‌های توزیع شدهٔ شبه گویا توسط معادلات دیفرانسیل جزئی هذلولوی (هایپربولیک) مدل شده و پس از خطی سازی معادلات دیفرانسیل حاصل حول نقطه عملیاتی و تبدیل لاپلاس، تابع انتقال سیستم به صورت معادله (۱) تعریف می‌گردد [۱]:

$$G_p(s) = \frac{P_1(s) - P_2(s)e^{-st_d}}{Q(s)} \qquad (۱)$$

قابلیت سیستم‌های توزیع شده شبه گویا برای نمایش دسته وسیعی از مدل های دینامیکی مشاهده شده‌اند. این نوع توابع، دارای تعداد نامحدودی صفر می باشند که می‌توانند در سمت راست محور موهومی قرار گرفته و باعث تأخیر فاز و کندی در پاسخ سیستم شوند. این

1. Quasi Rational Distributed System (QRDS)

خاصیت سسیتم‌ها، مشکلات شدید کنترلی در پی‌خواهد داشت. [۱]
مدل دینامیکی توزیع اندازه ذره فرایندهای ذره‌ای که زیر مجموعه سیستم‌های پارامتر گسترده می‌باشد نیز به شکل معادله (۱) تعریف می‌گردد. این دسته از سیستم‌ها تشکیل دهنده دسته وسیعی از فرایندهای شیمیایی می‌باشند. از جمله محصولات این صنایع می توان به فرایندهای کریستالیزاسیون، تولید پروتئین ها، امولسیون پلیمرها برای تولید لاستیک خام، تولید سیلیکون طی فرایند تجزیه حرارتی گاز سیلان درون راکتور سیّال بستر، اشاره کرد. یکی از خواص سیستم‌های ذره‌ای، همزمانی حضور دو فاز پیوسته و گسسته (پراکنده) است که باعث وقوع پدیده‌های شیمی- فیزیکی همانند هسته زایی، رشد، تجمع ذرات، شکست ذرات، ذوب و انجماد ذرات در طی فرایند، خواهد شد که در طی فرایندهای همگن دیده نمی‌شوند. این دسته از فرایندها تعیین‌کنندهٔ خواص شیمیایی و فیزیکی محصولات مانند اندازهٔ ذرات، شکل، تخلخل و وزن ملکولی، خواص مکانیکی و فیزیکی- شیمیایی محصولات می‌باشند. برای مثال، در مورد تولید رنگ پودری تیتانیم با کیفیت بالا نیازمند اندازه‌ای در حدود ۰/۱ الی ۰/۳ میکرومتر می‌باشیم که این امر نشان دهنده اهمیت دقت در شرایط عملیاتی در طی فرایند تولید و اهمیت کنترل این گونه فرایندها به منظور دستیابی به محصول مطلوب است. همچنین در فرایندهای کریستالیزاسیون، اندازه و توزیع دانه بندی ذرات، یک شاخص مهم کیفیت است که به شدت بر کیفیت محصول و همچنین فرایندهای پایین دستی مربوط به این صنعت همانند فیلتراسیون، سانتریفوژ و آسیاب کردن اثر می‌گذارد. در تمامی این مثال‌ها، توزیع اندازه ذره[1] مبین یک رابطه حساس میان شاخص‌های کیفیت محصول و متغیرهای عملیاتی فرایند می باشد. بنابراین، قابلیت کنترلی مؤثر به منظور مطلوب نگه داشتن توزیع دانه‌بندی، برای تنظیم کردن کیفیت محصول نهایی الزامی است. در اینجا پس از بررسی مدل دینامیکی فرایندهای ذره‌ای به روش‌های ارائه شده در زمینه کنترل این دسته از فرایندها می‌پردازیم [۳-۲].

۲ـ بررسی مدل و رفتار دینامیکی سیستم‌های ذره‌ای

به منظور شناخت رفتار و بررسی دینامیکی سیستم‌های فرایندی ذره‌ای، کریستالیزور نوع تعلیق آمیخته- محصول آمیخته[2] را به دلیل اهمیت و کاربرد آن در صنایع شیمیایی.مورد بررسی قرار می‌دهیم. این دسته از کریستالیزورها به علت ساختار ساده و همگن بودن خواص در تمام سیستم، از دیدگاه کنترلی و تنظیم شرایط عملیاتی، مورد توجه قرار دارند. در بخش بعد پس از مدلسازی این نوع کریستالیزوربه بررسی خواص دینامیکی این فرایند که در قالب یک شکل عمومی بیان خواهد شد می‌پردازیم.

۲-۱ مدلسازی کریستالیزور تعلیق آمیخته- محصول آمیخته

به منظور مدلسازی رفتار دینامیکی و توزیع دانه‌بندی محصولات در سیستم‌های ذره‌ای، علاوه بر اعمال معادلات معمول بقاء جرم، انرژی و ممنتوم، نیازمند اعمال معادله موازنه جمعیت در معادلات بقاء نیز می‌باشیم. این معادله- معادله موازنه جمعیت- تعیین کنندهٔ رفتار دینامیکی سیستم‌های ذره‌ای است و نقش بسیار مهمی در بررسی روش‌های ارائه شده برای کنترل این دسته از فرایندها دارد.
به منظور مدلسازی کریستالیزور، فرض می‌کنیم که سیستم به طور پیوسته و همدما عمل می‌کند. معادلات حاکم بر سیستم عبارتند از [۴]:
معادله موازنه جمعیت:

$$\frac{\partial F_n}{\partial t} + g\frac{\partial F_n}{\partial r} + \frac{F_n}{\tau} = 0 \qquad (۱)$$
$$F_n(0,t) = \varepsilon k_n g^{i-1}\left(\rho k_v m_3\right)^j$$

در رابطه فوق F_n تابع چگالی جمعیت،τ مدّت اقامت، r بعد مشخصه و t زمان ، ε کسر حجمی مایع درون کریستالیزور، ρ چگالی (دانسیته) جامد، m ممنتوم، g تابع رشد خطی، و k_n و k_v ضرایب ثابت می‌باشند.
موازنه جزء حل شده:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{\varepsilon}\left[\frac{\left(c_f - c\right)}{\tau} + \left(c-\rho\right)gk_a m_2\right] \qquad (۲)$$
$$C = \frac{c}{=}$$
$$c$$

در رابطه فوق c غلظت جزء حل شده و C غلظت بی‌بعد شدهٔ جزء حل شده است. معادله سرعت رشدg ، ممنتوم m و کسر حجمی فاز مایع به صورت زیر بیان می‌شوند:

1. Particle Size Distribution (PSD)
2. Mixed Suspension-Mixed Product Removal (MSMPR)

$$g = k_g(c - c_s)$$
$$m_k = \int_0^\infty r^k F_n \qquad (۳)$$
$$\varepsilon = 1 - k_v m_3$$

شرایط اولیه در معادلات فوق برابر با حالت پایا در سیستم، در نظر گرفته شده‌اند. به منظور حل معادلات حاکم، متغیرهای موجود در معادلات، نسبت به شرایط پایا در سیستم بی بعد شده‌اند:

$$\overline{Z} = \frac{r}{g\tau}, \quad Y(Z,\theta) = \frac{F_n(r,t)}{F_n(0,0)}, \quad T = \frac{\tau}{\overline{\tau}}, \quad M_n = \frac{m_n}{\overline{m}_n}$$
$$C_f = \frac{c_f}{\overline{c}_f}, \quad C = \frac{c}{\overline{c}}, \quad E = \frac{\varepsilon}{\overline{\varepsilon}}, \quad C_s = \frac{c_s}{\overline{c}_s} \qquad (۴)$$

زیر وندهای s و f به ترتیب بیانگر حالت اشباع و خوراک ورودی به سیستم می‌باشند. علامت (-) بر روی متغیرها نشان‌دهنده شرایط پایا برای متغیر مورد نظر در سیستم است. با خطی سازی معادلات (۱) و (۲) حول نقطه پایدار و تبدیل لاپلاس، چنین خواهیم داشت:

$$\hat{Y}(Z,s) = \left\{\left[c_4 - \frac{1}{(1-C_s)s}\right]e^{-Z(s+1)} + \frac{e^{-Z}}{(1-C_s)s}\right\}$$
$$\frac{c_1\hat{C}_f - (c_1-1)\hat{T} + c_2\hat{M}_2}{\overline{\varepsilon}s + c_2} \qquad (۵)$$
$$+ c_5 e^{-Z(s+1)}\hat{M}_2 - \left[\frac{e^{-Z(s+1)} - e^{-Z}}{s}\right]\hat{T}$$

در رابطه فوق، نماد ($\hat{}$) بر روی متغیرها بیانگر تعریف در فضای لاپلاس است. رابطه فوق، توزیع دانه‌بندی ذرات درون کریستالیزور را در فضای لاپلاس ارائه می‌دهد. با محاسبه جزء جرمی تجمعی[1] به عنوان متغیر کنترل شونده چنین خواهیم داشت:

معادله جزء جرمی تجمعی:

$$M_c(Z_c,t) = \frac{m_c(r_c,t)}{m_c(r_c,0)} = \frac{\int_{r_c}^{\infty} r^3 F_n(r,t)dr}{\int_{r_c}^{\infty} r^3 F_n(r,0)dr} \qquad (۶)$$

در رابطه فوق r_c بیانگر یک طول مشخص به منظور ارزیابی جزء جرم تجمعی و Z_c حالت بی‌بعد متغیر مذکور است. معادله (۶) در فضای لاپلاس، پس از اعمال رابطه (۵)، مساوی خواهد بود با

$$\hat{M}_c = \left\{\left[c_4 - \frac{1}{(1-C_s)s}\right]\frac{P_{Z_c}(s)e^{-Z_c s}}{P_{Z_c}(0)(s+1)^4} + \frac{1}{(1-C_s)s}\right\}\frac{c_1\hat{C}_f - (c_1-1)\hat{T}}{\overline{\varepsilon}s + c_2}$$
$$+ \frac{c_5 P_{Z_c}(s)e^{-Z_c s}}{P_{Z_c}(0)(s+1)^4}\hat{M}_2 - \left[\frac{\left[P_{Z_c}(s)/P_{Z_c}(0)\right]e^{-Z_c s} - (s+1)^4}{s(s+1)^4}\right]\hat{T} \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، $P_{Z_c}(s)$ مساوی است با:

$$P_{Z_c}(s) = Z_c^3(s+1)^3 + 3Z_c^2(s+1)^2 + Z_c(s+1) + 6 \qquad (۸)$$

معادله (۷) بیان کننده توزیع دانه‌بندی ذرات در یک سیستم ذره‌ای است که در قالب معادلات توزیع شده شبه گویا، معادله (۱)، بیان شده است.

حال به بررسی خواص و رفتار عمومی سیستم‌های ذره‌ای، همانند کریستالیزورها، که زیر مجموعه سیستم‌های توزیع شده شبه‌گویا می‌باشند، می‌پردازیم.

۲-۲ بررسی رفتار دینامیکی سیستم‌های ذره‌ای [۱]

در بررسی‌های صورت گرفته در مورد رفتار سیستم‌های ذره‌ای با مسائلی روبرو می‌شویم که پاسخ به این سؤالات در فهم مسائل دینامیکی و ارائه راهکارهای کنترلی به منظور بهبود شرایط عملیاتی به ما کمک خواهد کرد. این مسائل عبارتند از:

۱- این نوع سیستم‌ها چه نوع دینامیک حلقه بازی از خود نشان می‌دهند؟

۲- در چه شرایطی دارای مینمم فاز[2] هستند؟ آیا می توان رفتار سیستم را هنگامیکه دارای مینیمم فاز و یا غیر مینیمم فاز[3] می‌باشند، پیش بینی کرد؟

۳- چگونه می‌بایستی یک کنترل کننده پیش بین برای معادلات توزیع

1. Cumulative Mass Fraction (CMF)

2. minimum phase
3. non-minimum phase

شده شبه گویا طراحی کرد؟ آیا می توان از مدل‌های تقریبی برای طراحی کنترل کننده‌ها استفاده کرد: برای مثال تقریب های درجه ۱ یا ۲ برای تقریب پارامتر تأخیر زمانی؟

۴- آیا یک سیستم توزیع شده شبه گویا با رفتار غیر مینیمم فاز می‌تواند به یک سیستم با رفتار مینیمم فاز در طی اصلاح شرایط سیستم تبدیل شود؟ اگر چنین است، چه تمهیدی می‌بایستی برای این موضوع، در نظر گرفت؟

پاسخ به این سوالات در شناخت اینکه مکان هندسی صفرهای شبه چند جمله ای - صورت معادله (۱) با نام شبه چند جمله‌ای شناخته می‌شود - در کدام سمت از محور موهومی قرار دارند به تشخیص این که، سیستم دارای مینیمم فاز یا غیر مینیمم فاز هست واز نظر دینامیکی چگونه رفتار می‌کند، کمک خواهد کرد.

با مطالعات صورت گرفته در مورد این دسته از سیستم‌ها، برخی از مهمترین رفتارهای دینامیکی سیستم‌های ذره‌ای، شناخته شده‌اند که عبارتند از:

۱- سیستم‌های ذره‌ای، مشخصات سیستم‌های متمرکز شده را از نظر پاسخ به تأخیر زمانی نشان نمی‌دهند.

۲- تعدادی از سیستم‌های ذره‌ای رفتار سیستم‌های غیر مینیمم را با یک عملکرد ضعیف از پایداری با کنترل کننده های PID نشان می‌دهند که این امر باعث ایجاد نوسان در پاسخ خواهد شد.حضور تأخیر فازهای بزرگ درون سیستم، نشان دهندهٔ یک سیستم غیر مینیمم فاز است که باعث محدودیت در طراحی بهرهٔ کنترل‌کننده‌ها می‌گردد. این امر، سبب طراحی کنترل کننده‌هایی شده است که می‌توانند تأخیر زمانی را جبران کنند. برای مثال، پیش‌بینی‌کنندهٔ اسمی، توانایی جبران این تأخیر زمانی را در شرایط خاص خواهد داشت (هنگامی که P_1 در رابطه (۱) برابر با صفر باشد)

۳- پاسخ سیستم‌های ذره‌ای به ورودی پله‌ای دارای تأخیر زمانی نیست. به هر حال در عمل، تفاوت قائل شدن بین پاسخ کند اولیه یک سیستم مرتبه بالا بدون تأخیر زمانی و یک سیستم با تأخیر زمانی بسیار مشکل است.

۴- یک تغییر ناگهانی، هنگامی که ترم مربوط به تأخیر زمانی فعال می شود در پاسخ دیده می‌شود و همچنین گاهی تغییر علامت در شیب پاسخ نیز ملاحظه می‌گردد. این تغییر شدید درون این سیستم‌ها همواره قابل ملاحظه نخواهد بود.

۵- بعضی از سیستم‌های ذره‌ای رفتار شدید سیستم‌های دارای تأخیر زمانی را نشان می‌دهند و بعضی دیگر رفتار سیستم‌های مینیمم فاز را نشان می دهند.

۶- تعدادی از این سیستم‌ها دارای رزونانس در فرکانس‌های بالا می‌باشند.

۷- شبه چند جمله‌ای‌هایی که در صورت مدل دینامیکی سیستم‌های ذره‌ای ظاهر می‌شوند اثرات آینده خود را از اثرات حال و گذشته به ارث برده‌اند که این امر باعث تشدید مسائل کنترلی خواهد شد.

متأسفانه خواص ذکر شده در بالا باعث شده‌اند که این سیستم‌ها دارای رفتار واحدی نباشند و به همین دلیل، بررسی این مدل‌ها بسیار پیچیده خواهد بود. بعلاوه ممکن است سیستم‌های ذره‌ای از حالت سیستم مینیمم فاز به سیستم غیرمینیمم فاز برسند. به منظور شناخت بهتر و دقیق‌تر رفتار این دسته از سیستم‌ها به بررسی مکان هندسی ریشه‌های شبه چندجمله‌ای سیستم‌های ذره‌ای می‌پردازیم.

۲-۲-۱ مکان هندسی ریشه ها [۱]

رفتار دینامیکی نمودار فاز سیستم‌های ذره‌ای توسط صفرهای این سیستم‌ها بیان می‌شود. این سیستم‌ها دارای تعداد بی‌شماری صفر می‌باشند که مکان هندسی این صفرها برای طراحی یک کنترل کننده بسیار مهم است. یک فرم کلی برای بیان موقعیت‌های صفرهای یک شبه جمله‌ای، به صورت زیر است:

$$G(s)=\sum_{j=0}^{n}P_j(s)e^{-s\beta_j} \qquad (۹)$$

که $P_j(s)$ می تواند یک چند جمله ای درجه m باشد.

در اینجا صفرهای یک چندجمله‌ای به فرم زیر که مشابه یک سیستم توزیع شده شبه‌گویا می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است:

$$N(s)=P_1(s)-P_2(s)e^{(-st_d)}=0 \qquad (۱۰)$$

با بسط رابطه فوق، چنین خواهیم داشت:

$$N(s)=(s^n+a_1s^{n-1}+\cdots+a_n)-K(s^m+a_1s^{m-1}+\cdots+a_m)e^{-st_d} \qquad (۱۱)$$

برای $|s|$ بزرگ، معادله فوق به صورت زیر در خواهد آمد:

$$N_C(s) = s^n - ks^m e^{(-st_d)} = 0 \qquad (۱۲)$$

معادله فوق دارای تعداد نامحدودی صفر است. ریشه مدول های بزرگ رابطه فوق به شکل زیر بیان می‌شود:

$$s_j = \left(1/t_d\right)\left[\left\{ ln|K| + (n-m)ln\left|2k\pi \mp (n-m)\pi/2\right|\right\} + i\left\{2k\pi \mp (n-m)\pi/2\right\} + \varepsilon(k)\right] \qquad (۱۳)$$

در رابطه فوق هنگـامی کـه $|k| \to \infty$ آنگـاه $\varepsilon(k) \to 0$. از علامـت منفی هنگامی کـه $k>0$ و از علامـت مثبـت هنگـامی کـه $k<0$ باشـد استفاده می شود.

هنگامی که n=m باشد رابطه (۱۳) به صورت زیر خلاصه می شود:

$$s_j = \left(1/t_d\right)\left[\ln|K| + i(2k\pi)\right] + \varepsilon(k) \qquad (۱۴)$$

منحنی مکان هندسی ریشه‌ها بـه شـکل یـک خـط عمـودی بـوده، و صفرها به غیر از صفرهای مبدأ به سمت این خط میـل مـی‌کننـد. بـه ازای $|k|>1$ منحنی در سمت راست محور موهومی و به ازای $|k|<1$ خط در سمت چپ محور موهومی قرار خواهد گرفت.

هرگاه $n \neq m$، معادله (۱۳)تعداد نامحدودی صفر خواهد داشت که به صورت مجانبی به سمت مکان منحنی زیر میل می کنند:

$$\left|s^{n-m}e^{st_d}\right| = |K| \qquad (۱۵)$$

منحنی حاصله به صورت یک منحنی نمایی برای |s| بـزرگ مـی‌باشـد. بعلاوه به ازای $n > m$ منحنی بـه طـور کامـل در سـمت چـپ محـور موهومی و به ازای $n < m$ منحنی به طور کامل در سمت راست محور موهومی قرار خواهد گرفت.

به طور کلی برای پیدا کردن صفرهای یک شبه چند جمله ای هنگامی که مقدار این صفرها کوچک باشند از تقریب پاد[1] و هنگامی که صفرها بزرگ باشند از روش نیوتن استفاده می شود. این صـفرها بـه گونـه‌ای می توانند رفتار کنند که سیستم دارای ویژگی‌های زیر باشد:

۱- هیچ صفری در سمت راست محور موهومی نداشته باشد.

۲- تعداد محدودی صفر در سمت راسـت محـور موهـومی داشـته باشد.

۳- تعداد نامحدودی صفر در سمت راست محـور موهـومی داشـته باشد.

رفتار فوق می تواند در سیستم تغییر کند، برای مثال صفرها از سـمت سمت راست محور موهومی به سمت چپ محور موهومی و بـر عکـس حرکت کنند که این امر پیچیدگی‌های زیادی را در زمینه کنترل ایـن دسته از فرایندها ارائه می‌کند.

پس از آشنایی با رفتار سیـستم‌هـای ذره‌ای در قالـب مکـان هندسـی ریشه‌ها به بررسی روش‌های ارائه شده در زمینه کنترل ایـن دسـته از سیستم‌ها می‌پردازیم.

۳ـ بررسی روش‌های کنترلی سیستم‌های ذره‌ای

لازم است قبل از پرداختن به روش‌های کنترلی ارائـه شـده در زمینـه سیستم‌های ذره‌ای، به علت عدم توانایی پیش‌بینی کننـده اسـمیت در کنترل این دسته از سیستم‌ها اشاره کنیم:

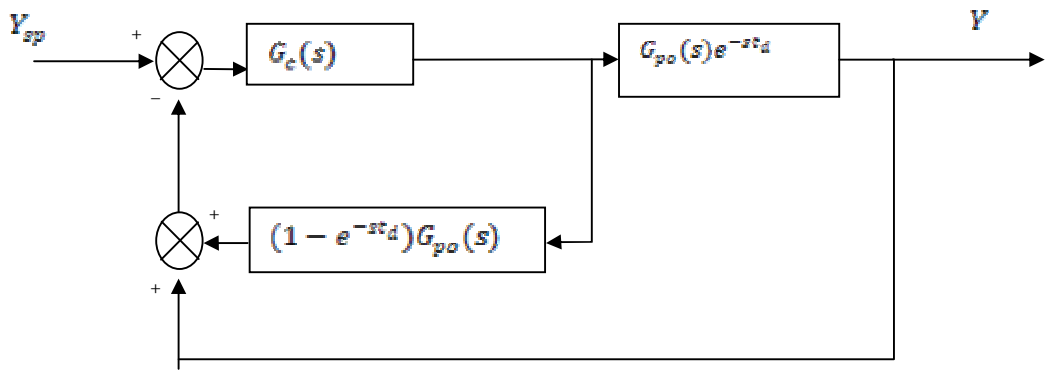
۳-۱ پیش‌بینی‌کننده اسمیت و عدم توانایی استفاده مستقیم از این روش در کنترل سیستم توزیع شدهٔ شبه‌گویا:

جبران کننده اسمیت با ساختاری که در شـکل (۱) نـشان داده شـده است یکی از قدیمی‌ترین روش‌های کنترل سیستم‌هایی می باشند که دارای تأخیر زمانی خالص هستند.

در این روش با تقسیم سیستم به دو قسمت دارای تأخیر زمانی و بدون تأخیر زمانی و با وارد کردن جبـران کننـدهٔ اسـمیت مـی‌تـوان جملـه مربوط به تأخیر زمانی را از تابع تبدیل مدار باز حلقه کنترل خارج کرد و سیستم را بدون وجود تأخیر زمانی کنترل نمود.

استفاده از روش پیش بینی کنندهٔ اسمیت برای سیستم‌هـای ذره‌ای و در قالب کلی‌تر برای سیستم‌های توزیع شده شبه‌گویا، بـه علـت عـدم تقسیم این دسته از سیستم به دو صورت، یکی شامل تـأخیر زمـانی و دیگری بدون تأخیر زمانی در فضای لاپلاس، سبب شده است تا کنترل مناسب اینگونه سیستم‌ها با کنترل کننده اسمیت مقدور نباشد. اِعمال

1. Padé



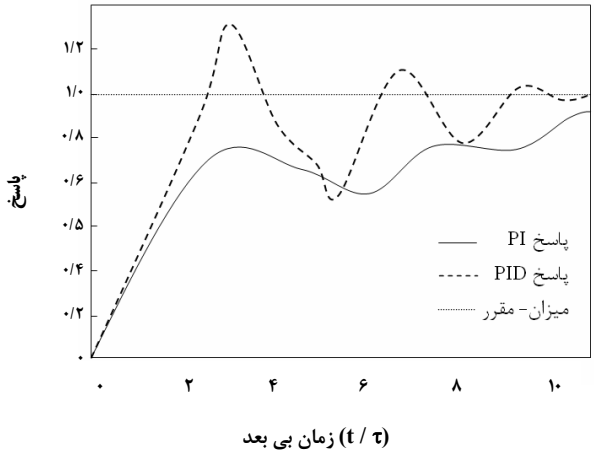
شکل ۱ـ جبران کنندهٔ اسمیت

کنترل‌کننده اسمیت بر این گونه سیستم‌ها، فرایند را دچار نوسان می‌کند. از طرفی عملکرد خوب و مورد نظر از جبران کننده اسمیت به شرط شناخت دقیق سیستم و یک مدلسازی ریاضی کاملاً دقیق از سیستم، ممکن خواهد بود که این قابلیت مدلسازی دقیق فرایند در سیستم‌های توزیع شده شبه‌گویا ممکن نیست و در نتیجه باعث خواهد شد تا فرایند کنترل با پیش‌بینی‌کنندهٔ اسمیت نتایج خوبی به همراه نداشته باشد.

۲-۳ عملکرد کنترل کننده‌های PID وPI [۱]

در این بخش به بررسی پاسخ یک کریستالیزور مخلوط آمیخته-محصول آمیخته به یک تغییر پله‌ای در ورودی سیستم در حضور کنترل کننده PID و PI می‌پردازیم. در این مورد، متغیر کنترل شونده میزان جرم تجمّعی می‌باشد. در این روش، پارامترهای کنترل‌کننده توسط معیار زیگلر- نیکولز محاسبه شده‌اند. شکل (۲) نشان دهندهٔ رفتار این سیستم در حضور کنترل کننده PID و PI می‌باشد.

همانطور که شکل (۲) نشان می‌دهد کنترل کننده‌های PI و PID در پایدار کردن سیستم و رساندن پاسخ نهایی به میزان مقرر، عملکرد نامطلوبی از خود نشان می‌دهند. آنچه که از رفتار این دسته از سیستم‌ها با توجه به عملکرد ضعیف کنترل‌کننده‌های PI و PID می‌توان نتیجه گرفت این است که رفتار پیچیده کنترلی سیستم‌های ذره‌ای، توانایی روش‌های کنترلی PI و PID را به شدت کاهش می‌دهند به نحوی که سبب شده‌اند که با بررسی بیشتر این گونه سیستم‌ها روش‌های مناسبی برای حل مشکلات کنترلی این سیستم‌ها ارائه گردد. در ادامه به برخی از این روش‌ها اشاره می‌کنیم.



شکل ۲ـ پاسخ جزء جرمی تجمعی برای سیستم مدار بسته با کنترل PI و PID تحت تنظیمات زیگلر- نیکولز

۳-۳ کنترل پیشگو[۵]

روش کنترل پیشگو[1]، یکی از روش‌های موثر در کنترل سیستم‌هاست. این روش، معمولاً در مقایسه با روش‌های کنترلی تصحیح کننده مانند کنترل PID عملکرد بسیار بهتر و مناسب‌تری را خصوصاً در سیستم‌های ذره‌ای نشان می‌دهد. به عنوان مثال در مورد

1. Model Predictive Control (MPC)

کریستالیزورها کنترل پیشگو عملکرد و نتایج بهتری را در مقایسه با روش‌های کنترلی تصحیح‌کننده در توزیع دانه‌بندی ذرات به همراه خواهد داشت، به این دلیل که اندازه کریستال‌ها بعد از تولید نمی‌تواند در شرایط کریستالیزاسیون تغییر ایجاد کند. این امر، اهمیت کنترل پیشگو را در این دسته از فرایندها نشان می‌دهد.

در مدل کنترلی پیشگو ، عمل کنترل پس از حل نتایج حاصل از هر نمونه و بهینه کردن آن صورت می پذیرد. مدل برای پیش بینی نتایج آیندهٔ فرایند بر اساس نتایج حاصل و پیشین طراحی می‌شود. در این دسته از روش‌ها معمولاً یک تابع هدف به منظور کمینه کردن نتایج عملیات نیز انتخاب می‌شود که در طی فرایند کنترل عملیاتی به کنترل مالی نیز می پردازد. بررسی کنترل نشان می‌دهد که یک MPC خطی، یک کنترل وفق پذیر و امکان پذیر است که یک کنترل مناسب و مورد اطمینان برای اکثر سیستم‌های فرایندی می‌باشد.

۳-۴ کنترل بهینه بر خط[1] [۶]

در سال‌های اخیر، استفاده از کنترل بهینه به منظور کنترل سیستم‌ها توسعه یافته است. افزایش کیفیت و کاهش هزینه‌های جانبی، کاربرد این نوع کنترل را افزایش داده است. روش‌های پیشین کنترل بهینه به صورت کنترل برون خط[2] است که پس از اتمام یک فرایند ناپیوسته، کیفیت محصول، اندازه‌گیری می‌شود و سپس تغییرات لازم در خوراک ورودی و یا شرایط عملیاتی دستگاه اعمال می‌گردد. در یک نگاه کلی می‌توان گفت روش‌های کنترل برون خط به دلایل زیر به فراموشی سپرده شده است:

۱- اشتباه در مدلسازی واحد

۲- وسایل اندازه گیری نامناسب برای اندازه گیری حالت سیستم

۳- عدم اطمینان در شرایط اولیه

۴- وقوع اغتشاشات غیر قابل اندازه گیری.

این عوامل، سبب انگیزش استفاده از کنترل بهینهٔ روی خط در طی فرایندهای شیمیایی شده است. این دسته از روش‌های کنترلی که معمولاً در مورد سیستم‌های ناخطی و پیچیده کاربرد دارد با استفاده از روش‌های مختلف، همانند استفاده از فیلتر کالمن، متغیرهای مجهول فرایند را که به سادگی نمی‌توان محاسبه کرد تخمین می‌زند و سپس با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، شرایط عملیاتی را برای دستیابی به محصول مطلوب، محاسبه می‌کند.

۴-۳ تکنیک های طراحی تقریبی به منظور کنترل سیستم‌های ذره‌ای

روش‌های تقریبی یکی از روش‌های معمول در کنترل سیستم‌های ذره‌ای می‌باشند. در این دسته از روش‌ها مدل سیستم توسط روش‌های خاصی به صورت دیگری که دارای شکل ساده‌تری از لحاظ دیدگاه کنترل کلاسیک می‌باشد بیان می‌شود و عمل کنترل بر روی سیستم انجام می‌پذیرد. چندین روش تقریبی را می‌توان برای طراحی کنترل کننده‌ها در سیستم‌های ذره‌ای مورد استفاده قرار داد. یکی از این روش ها تقریب تابع انتقال سیستم توزیع شده شبه‌گویا توسط توابع نسبتی می‌باشد. در این روش، جمله مربوط به تأخیر زمانی را از حالت نمایی به حالت یک تابع نسبتی تبدیل می‌نمایند. این تقریب تابع برای جمله نمایی را می توان با استفاده از تقریب پادِ بدست آورد. روش دیگر، استفاده از یک تابع تبدیل دارای تاخیر زمانی به منظور مدل کردن سیستم است. در این روش، از حاصل ضرب یک تابع تأخیر در یک چند جمله‌ای نسبی استفاده می شود[۱].

۱-۴-۳ مدل‌های تأخیر زمانی همراه با لختی [۷]

مدل‌های توزیع شده شبه‌گویا با تعداد نامحدودی صفر سمت راست، رفتار فازی مشابه با سیستم های دارای تأخیر زمانی را از خود نشان می دهند. اگر سیستم، رزونانس زیاد و قوی از خود نشان ندهد پاسخ فرکانسی سیستم به خوبی می تواند توسط یک مدل تأخیر زمانی همراه با لختی مدل شود. این روش توسط (۱۹۷۹) ویت[1] پیشنهاد شده است.

در انتخاب چند جمله‌ای مربوط به این مدل، انتخاب درجه ممکن است مشکل ساز شود. درجه‌های مختلف ممکن است بر اساس این که آیا پاسخ پله‌ای یا نمودار بد مورد استفاده قرار گرفته است بروز کند. برای مثال، پاسخ حلقه باز جزء جرمی تجمعی در یک راکتور سیّال بستر کلساینر به یک تغییر پله‌ای در نرخ دانه دهی (شکل (۳)) یک جهش کند را نشان می دهد که بیان کننده پُرمیرا بودن سیستم خواهد بود که در نتیجه یک سیستم درجه ۲ برای بیان فرایند مناسب خواهد بود.

اما نمودار بد برای این سیستم، شکل (۴)، در فرکانس های بالا نشان

1. On Line
2. Off Line

دهندهٔ یک شیب منفی به مقدار (۱-) می‌باشد که بیـان کننـدهٔ رفتـار یک سیستم درجه ۱ است.

نتایج حاصل از این روش را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

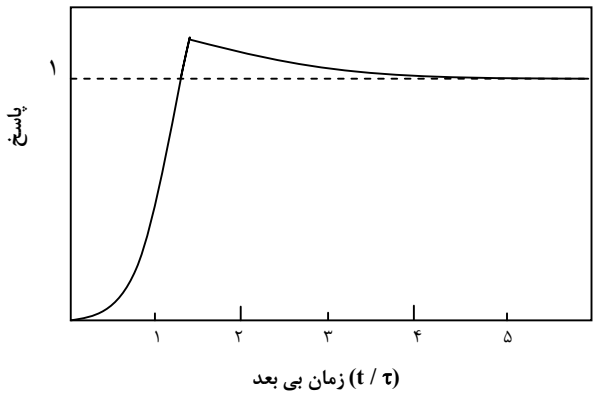
۱- عملکرد سیستم کنترل شده ممکن است با یک تقریب خیلـی خوب توسعه یابد.

۲- این مدل برای سیستم هایی که دارای تعداد محدودی صفر در سمت راسـت محـور موهـومی هـستند مـورد اسـتفاده قـرار نمی‌گیرد

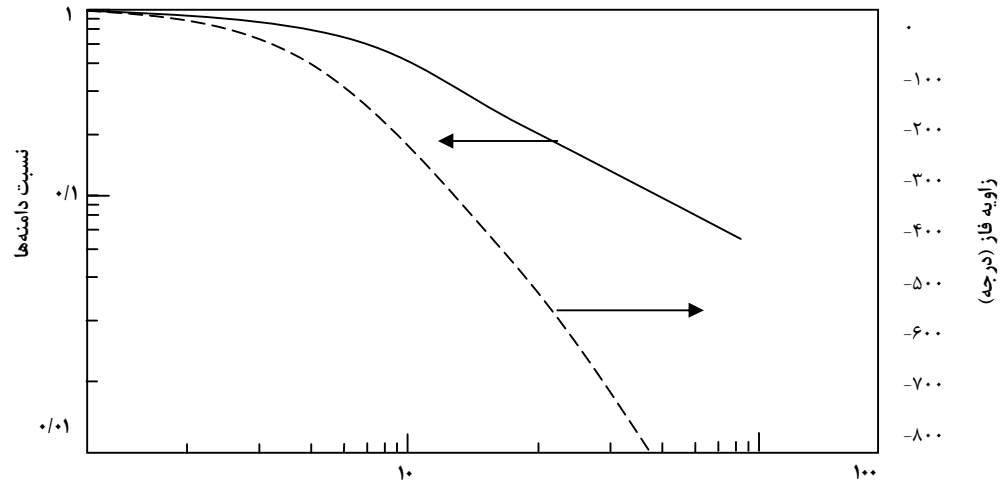
۳-۴-۲ استفاده از تقریب پادِ

در ایـن روش، جملـهٔ تأخیرزمـانی $exp(-st_d)$ توسـط نـسبت دو چنـد جملـه‌ای $A(s)/B(s)$ بیـان مـی‌شـود کـه در آن A(s)=B(-s) و $|A(w)/B(w)|=1$. در اینجا چند جمله ای $B(S)$ به صـورت زیـر ارائه می‌گردد:

$$B(s)=1+\frac{st_d}{2}+\frac{(st_d)^2}{2!}\frac{n(n-1)}{2n(2n-1)}+\frac{(st_d)^3}{3!}\frac{n(n-1)(n-2)}{2n(2n-1)(2n-2)}+\cdots \qquad (16)$$



شکل ۳ـ دینامیک جزء جرمی تجمعی نرمالیزه شده



شکل ۴ـ نمودار بد در کلساینر

1. Vit

این روش، شبه چند جمله‌ای را به یک تابع نسبتی تبدیل می کند. در این روش می‌بایستی دقت شود که اگر درجه تقریب پادِ افـزایش پیـدا کند میزان صفرهای اشتباه سیستم که با ریشه‌های این روش، تقریـب زده شده است زیاد می‌شود.

۳-۴-۳ روش توسعه یافتهٔ اسمیت [۱]

این روش حالت توسعه یافتهٔ روش اسمیت اسـت. ایـن دو روش دارای ساختار یکسانی می‌باشند که در شکل (۵) نشان داده شده است.

در این روش G_p به دو تابع انتقال تقسیم شده است.

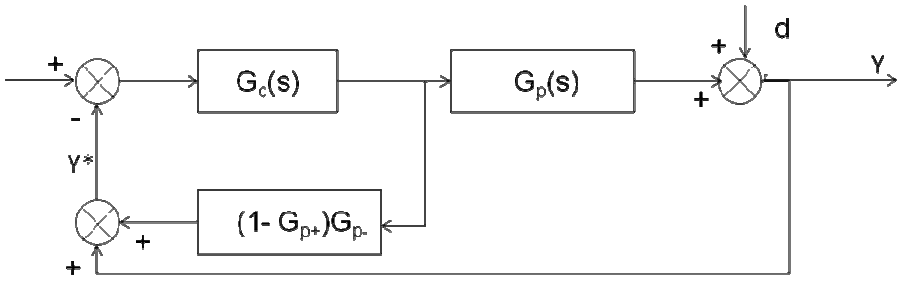
$$G_p = G_{p^+} G_{p^-} \qquad (۱۷)$$

که G_{p^-} دارای مینیمم در منحنی فاز خود و G_{p+} بدون میـنمم در منحنی فاز می باشد و شرط $G_{p^+}(0) = 1$ را تأیید می‌کند. در ایـن روش، سعی شده است که پاسخ سیستم توسط G_{p^-} به عنـوان تـابع انتقال فرایند پیش بینی شود. یک محاسبه اولیه نشان می دهد که:

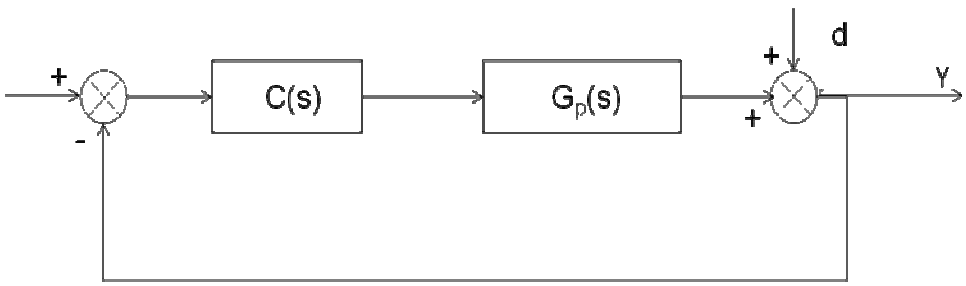
$$y^{\circ}(s) = y(s) + G_{p^-}(s)(1 - G_{p+}(s))u(s) \qquad (۱۸)$$

که y° به صورت آن‌لاین محاسـبه شـده و خطـای y_{sp}-y^{o} بـه عنـوان ورودی به کنترل کننده (G_C) وارد می‌شود. برای اینکه پیش‌بینی‌کننده پایدار باشد شرط لازم و کافی، پایداری مدار حلقه بـاز فرایندهاسـت. در این روش باید پایداری مدار حلقه باز همواره برقرار باشد. روش توسـعه یافته اسمیت مشابه روش کلاسیک پیش‌خور است به طوری که:

$$C(s) = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s)G_{p^-}(s)[1 - G_{p^+}(s)]} \qquad (۱۹)$$



شکل ۵ـ ساختار روش توسعه یافته اسمیت



شکل ۶ـ ساختار پیش‌خور

روش توسعه یافته اسمیت طراحی سیستم کنترل را بسیار شفاف می‌کند به نحوی که پاسخ مدار بسته به راحتی محاسبه می‌گردد. پاسخ مدار بسته برای کنترل توسعه یافته اسمیت برابر خواهد بود با:

$$y(s)=\left[\frac{G_c(s)G_{p-}(s)}{1+G_c(s)G_{p-}(s)}G_{p+}(s)\right]y_{sp}(s)+\left[1-\left[\frac{G_c(s)G_{p-}(s)}{1+G_c(s)G_{p-}(s)}G_{p+}(s)\right]\right]d(s)$$

(۲۰)

برای یک مجموع مربّعات خطاهای کمینه نسبت به مکان قطب‌ها در تغییر پله ای در y_{sp} یا در d ، تابع انتقال مدار بسته سیستم می‌بایستی دارای قطب‌هایی در مکان صفرهای سمت چپ تابع انتقال مدار باز و در تصویر آینه‌ای صفرهای سمت راست صفحه مختصات خود نسبت به محور موهومی باشد، همچنین قطب‌های باقی مانده می‌بایستی به اندازه کافی از محور موهومی در موقعیت بسیار دوری قرار بگیرند.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه بررسی رفتار سیستم‌های پارامتر گسترده و همچنین کنترل این دسته از سیستم‌ها می‌توان دریافت که بررسی رفتار این دسته از سیستم‌ها که دسته وسیعی از فرایندهای مهندسی شیمی را شامل می‌شود مورد توجه مهندسین می‌باشد. این امر نشان دهندهٔ شناخت نیازمندی صنعت در بررسی مسائل کنترلی این دسته از سیستم‌ها در طیف گسترده کاربرد این نوع فرایندها در صنایع می‌باشد.

آنچه که در طی مباحث عنوان شده می‌توان دریافت، روش‌های توسعه‌یافته در تحلیل قدرتمند رفتار این سیستم‌ها در فضای کنترل کلاسیک است. اما آنچه که می‌بایست بدان دقت شود، ساده‌سازی‌های صورت گرفته به منظور حل معادلات دیفرانسیل و خطی سازی معادلات ناخطی به منظور بیان رفتار ناخطی این دسته از سیستم‌هاست که باعث کاهش دقت مدل و طبعاً عدم اطمینان رفتار مدل بدست آمده خواهد شد. البته نباید توجه به روش‌های ارائه شده در این زمینه را نادیده گرفت زیرا تحلیل‌های صورت گرفته در این زمینه در بسیاری از موارد، عملکرد قابل قبولی را در زمینه بررسی رفتاردینامیکی و کنترلی این دسته از سیستم‌ها ارائه می‌کند. آنچه که در این میان نیازمند بررسی است، قابلیت ورود روش‌های جدید کنترلی به این دسته از سیستم‌ها به منظور پوشش ضعف‌های روش‌های موجود می‌باشد. کاربرد روش‌های جدیدی همچون استفاده از شبکه‌های عصبی به منظور پیش بینی رفتار سیستم‌های پیچیده‌تر و استفاده از روش‌های کنترلی مدرن، همانند کنترل فازی، می‌تواند پوشش دهنده کمبودها و ضعف‌های روش‌های دیگر در این دسته از فرایندها باشد[۸].

مراجع

[1] S. Ramanthan "Control of Quasi Rational Distributed Systems with Examples on Control of Cumulative Mass Fraction of Particle Size Distributed" PhD Thesis, Univ. of Michigan, Ann Arbor, (1988).

[2] Panagiotis D. Christofides a,b, Mingheng Lic, Lutz Mädler "Control of particulate processes: Recent results and future challenges" jouranl of Powder Technology, 175, 1-7 (2007).

[3] Panagiotis D. Christofides, Antonios Armaou "Control of Multiscale and Distributed Process Systems" Computers and Chemical Engineering, 29, 687-688, (2005).

[4] Shervin, M.B, R. Shinar, and S. Katz, "Dynamic Behavior Of The Isothermal Well Stirred Crystallizer With Classified Outlet" Chem. Eng. Progr. Symp. Ser, 65 (No.95), 75, (1969).

[5] No´ra Moldova´nyi, Be´la G. Lakatos, FerencSzeifert "Model predictive control of MSMPR crystallizers" Journal of Crystal Growth, 275, 1349-1354, (2005).

[6] G. P. Zhang S. Rohani "On-line optimal control of a seeded batch cooling crystallizer" Journal of Chemical Engineering Science, 58, 1887-1896, (2003).

[7] Vit, K., "Smith-like Predictor for Control of Parameter-Distributed Processes" Int, Journal of Control, 30, 179-193, (1979).

[۸] امیر حیدری، منصور شیروانی، "بررسی مدل‌های دینامیکی و کنترل سیستم‌های فرایندی ذره‌ای"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آبان (۱۳۸۶).