

بررسی روش‌های تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌های پیش‌بین و راهکارهای نوین تنظیم

پیمان باقری^۱، علی خاکی صدیق^۲

^۱ دانشجوی دکتری کنترل، قطب علمی کنترل صنعتی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Bagheri.Peyman@ee.kntu.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی برق، قطب علمی کنترل صنعتی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Sedigh@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳XX/X/X، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳XX/X/X)

چکیده: کنترل کننده‌های پیش‌بین با ویژگی‌های منحصر به فرد خود از قبیل حل مسئله قید، برخورد مهندسی با تأخیر و کاربرد در سیستم‌های چندمتغیره جایگاه ویژه‌ای در صنعت یافته‌اند. اما همانند سایر راهکارهای طراحی سیستم‌های کنترلی، کارکرد مطلوب و درست این کنترل کننده‌ها به تنظیم مناسب پارامترهای آن‌ها وابسته است. مسأله تنظیم کنترل پیش‌بین با توجه به ارتباط پیچیده و غیرخطی پارامترهای آن با عملکرد سیستم حلقه بسته مسأله‌ای بسیار دشوار است و در سال‌های اخیر توجه فراوانی به آن شده است. در این مقاله، نخست به بررسی تأثیر هر کدام از پارامترها بر رفتار کنترل پیش‌بین پراخته می‌شود و سپس مسأله تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین مورد توجه قرار می‌گیرد و ضمن مطالعه مروری روش‌های تنظیم ارائه شده در مراجع مختلف، راهکارهای نوین تنظیم بررسی شده‌اند. تأکید این مقاله بر روش‌هایی بر پایه‌های نظری است که به عبارت‌های بسته‌ای برای تنظیم منجر می‌شوند، زیرا فرمول‌های بسته بر پایه‌های نظری در تحلیل‌های حلقه بسته بسیار سودمنداند. هم‌چنین با استفاده از یک مثال، بعضی از روش‌های تنظیم را که عبارت‌های بسته تنظیم دارند مقایسه نموده و نقاط قوت و ضعف هر کدام بیان شده است.

کلمات کلیدی: کنترل پیش‌بین، تنظیم پارامترهای کنترل کننده، مدل مرتبه اول با تأخیر.

Review of Model Predictive Control Tuning Methods and Modern Tuning Solutions

Peyman Bagheri, Ali Khaki-Sedigh

Abstract: Model Predictive Controllers (MPC) are effective control strategies widely used in the industry. The desirable MPC performance requires appropriate tuning of the controller parameters. However, the MPC tuning parameters are related to the closed loop characteristics in a complex and nonlinear manner, so the tuning procedure is an intricate problem, which has received much attention in recent decades. In this paper, the effects of each tuning parameter on the closed loop behavior are studied. Then, the issue of MPC tuning problem is considered and a review of the available tuning methods are provided. Modern tuning strategies are also considered. The emphasis of this paper is on theoretical tuning strategies which lead to closed form tuning equations that can be used in closed loop analysis. Finally, a simulation study is employed to have a comparative study on some closed form tuning equations and the advantages and disadvantages of each method is clarified.

Keywords: Model Predictive Control, Controller tuning, First order plus dead time model.

دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس دسته‌بندی روش‌های تنظیم معرفی می‌گردد که در بخش‌های بعد بر اساس همین دسته‌بندی کارها مطالعه خواهند شد. در بخش سوم به بررسی روش‌های تنظیم متفرقه پرداخته شده است. بخش چهارم روش‌های تنظیمی را که مبتنی بر بهینه‌سازی به روش‌های عددی و یا محاسبات نرم هستند معرفی می‌کند. در بخش پنجم به روش‌های تنظیمی که فرمول بسته ارائه نموده‌اند می‌پردازیم. با توجه به اهمیت این دسته از روش‌ها، دسته‌بندی کوچک‌تری ارائه شده و با جزئیات بیشتری به این دسته از روش‌ها پرداخته شده است. در بخش ششم، مطالعه مقایسه‌ای از روش‌های تنظیم فرمول بسته بر روی فرآیند pH^2 پرداخته شده است. در نهایت در بخش نهایی این مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و مسأله تنظیم

پارامترهای آن

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل چند دهه است که به عنوان موفق‌ترین روش کنترل فرآیند پیشرفته جایگاه بسیار خوبی در صنایع مختلف پیدا کرده است. کاربردهای موفق این کنترل‌کننده‌ها از سال ۱۹۷۵ تا کنون در مراجع بسیاری آورده شده است [۱۲-۱]. در این بخش ابتدا کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدل به صورت مختصر معرفی می‌شود. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به روش‌های کنترلی اطلاق می‌شود که در آن‌ها روند زیر اجرا می‌شود [۶]:

- پیش‌بینی رفتار آینده سیستم در طول افق پیش‌بین^۳ با استفاده از مدلی که برای فرآیند در نظر گرفته شده است،
- تعریف یک تابع معیار^۴ به عنوان هدف بهینه‌سازی،
- حل مسأله بهینه‌سازی با استفاده از مدل پیش‌بین به منظور به دست آوردن سیگنال‌های کنترلی بهینه در طول افق کنترل^۵،
- اعمال اولین سیگنال کنترلی بهینه در طول افق کنترل و اجرای مجدد همین روند.

روش‌های مختلف کنترل پیش‌بین بر اساس سه بند فوق پایه‌گذاری شده‌اند. به عنوان دو نمونه معروف می‌توان به کنترل ماتریس دینامیکی [۱۶] و کنترل پیش‌بین تعمیم یافته^۶ [۱۷] که به ترتیب از پاسخ پله و تابع تبدیل برای پیش‌بینی رفتار خروجی سیستم استفاده می‌کند، اشاره نمود.

۲-۱ کنترل ماتریس دینامیکی سیستم‌های تک ورودی-

تک خروجی

در این بخش روابط حاکم بر طراحی کنترل ماتریس دینامیکی ارائه شده و پارامترهای تنظیم بررسی می‌شوند. همان‌طور که اشاره شد، کنترل

۱- مقدمه

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل^۱ به عنوان یکی از موفق‌ترین روش‌های کنترل فرآیند پیشرفته بیش از چهار دهه است که مطرح گردیده است. استقبال روزافزون از این روش کنترلی در صنعت و دانشگاه‌ها اهمیت آن را بیش از پیش نمایان می‌سازد. کاربردهای موفق این خانواده از کنترل‌کننده‌ها در صنایع مختلف، مخصوصاً صنایع شیمیایی مانند نفت و پتروشیمی در مراجع متعددی از بدو ارائه این روش‌ها تا سال‌های اخیر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۱۲-۱].

ویژگی‌های منحصر به فردی مانند قابلیت حل مسئله‌ی قید، برخورد اصولی و مهندسی با تاخیر و کنترل سیستم‌های چندمتغیره از دلایل موفقیت کنترل پیش‌بین در این چند دهه است. یکی از چالش‌های به کارگیری کنترل‌کننده‌های پیش‌بین بررسی اثر و تنظیم پارامترهای آن‌ها است. مسأله تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین از همان ابتدا مورد توجه محققان بوده است. با توجه به ارتباط پیچیده و غیرخطی پارامترهای تنظیم کنترل‌کننده‌های پیش‌بین با پایداری، عملکرد و مقاومت سیستم حلقه بسته، مسأله تنظیم دشوار و حل کامل آن مسأله بازی در حوزه کنترل پیش‌بین است. در سال‌های اخیر روش‌های فراوانی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین انجام شده است. در [۱۳] روش‌های تنظیم ارائه شده از سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۴ آورده شده است. کارهای جدیدتر تا سال ۲۰۰۹ در [۱۴] بررسی شده است. هم‌چنین در [۱۵] روش‌های تنظیم ارائه شده برای کنترل ماتریس دینامیکی^۲ معرفی شده‌اند. در این مقاله به بررسی مروری روش‌های تنظیم ارائه شده برای پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده‌های پیش‌بین پرداخته می‌شود. مطالعات انجام شده در زمینه تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین را می‌تون به سه دسته اصلی تقسیم کرد: روش‌های متفرقه تنظیم، تنظیم بر پایه روش‌های عددی و محاسبات نرم و فرمول‌های بسته تنظیم. هر کدام از این دسته‌ها به زیر دسته‌های کوچک‌تری تقسیم شده و کارهای انجام شده بر اساس این دسته‌بندی‌ها مطالعه خواهد شد. در این دسته‌بندی، فرمول‌های بسته تنظیمی که بر پایه‌های نظری ارائه شده‌اند اهمیت بیشتری دارند زیرا این فرمول‌ها در تحلیل‌های حلقه بسته بسیار سودمند است و دید خوبی از رفتار سیستم حلقه بسته از نظر پایداری، عملکرد و مقاومت ایجاد می‌کند. این روش‌ها با تفصیل بیشتری بررسی می‌شوند. در انتهای مقاله با استفاده از یک مثال، برخی از روش‌های تنظیم را که فرمول‌های بسته دارند مقایسه نموده و نقاط قوت و ضعف هر کدام نشان داده شده است.

در بخش دوم مقاله ابتدا ساختار کلی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین معرفی شده و سپس به کنترل ماتریس دینامیکی به عنوان یکی از کاربردی‌ترین روش‌های کنترل پیش‌بین می‌پردازیم. سپس پارامترهای قابل تنظیم معرفی شده و از طریق شبیه‌سازی تأثیر آن‌ها در کنترل ماتریس

³ Power of Hydrogen

⁴ Prediction Horizon

⁵ Cost Function

⁶ Control Horizon

⁷ Generalized Predictive Control (GPC)

¹ Model Based Predictive Control

² Dynamic Matrix Control (DMC)

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta u(n)} ([w(n) - \hat{y}_p(n)]^T Q [w(n) - \hat{y}_p(n)] \\ & \quad + [\Delta u(n)]^T R [\Delta u(n)]) \\ & \text{s. t.} \\ & u_{\min} \leq u(n+i) \leq u_{\max}, \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \\ & y_{\min} \leq \hat{y}_p(n+j|n) \leq y_{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, P \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن $w(n) = [w(n+1) \ w(n+2) \ \dots \ w(n+P)]^T$ سیگنال مرجع، Q و R ماتریس‌های وزنی مثبت نیمه معین و مثبت معین هستند. در حالتی که قیدهای مسأله بهینه‌سازی (۷) فعال نباشند، جواب بهینه عبارت است از:

$$\Delta u(n) = (G^T Q G + R)^{-1} G^T Q (w(n) - f(n)) \quad (8)$$

اولین عنصر $\Delta u(n)$ که $\Delta u(n)$ است، برای محاسبه $u(n)$ استفاده و به سیستم اعمال می‌شود. افق مدل N ، افق پیش‌بین P ، افق کنترل M و ماتریس‌های وزنی Q و R پارامترهای قابل تنظیم کنترل ماتریس دینامیکی هستند.

۲-۲ مسأله تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌های پیش‌بین

پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده‌های پیش‌بین عبارت‌اند از: زمان نمونه‌برداری (T_s)، افق پیش‌بینی (P) یا حد بالا و پایین افق پیش‌بینی (N_1, N_2)، افق کنترل (M)، افق مدل (N) که در کنترل ماتریس دینامیکی تعریف می‌شود، ضریب یا ماتریس‌های وزنی در تابع هزینه، (λ) برای حالت تک ورودی-تک خروجی و (Q, R) برای حالت چند ورودی-چند خروجی و قطب فیلتر نرم‌کننده ورودی مرجع (α). در ادامه به بررسی هر کدام از این پارامترها و تأثیر آن‌ها بر عملکرد کنترل کننده می‌پردازیم.

زمان نمونه‌برداری. انتخاب مناسب زمان نمونه‌برداری در گسسته‌سازی سیستم تأثیر بسزایی دارد و بزرگ‌تر از اندازه شدن آن می‌تواند باعث از دست رفتن بخشی از رفتار دینامیکی سیستم گردد هم‌چنین بیش از اندازه کوچک بودن آن حجم محاسباتی بالایی داشته و خطاهای محاسباتی را به همراه خواهد داشت. در بعضی از مراجع، به نحوه‌ی انتخاب زمان نمونه‌برداری مناسب پرداخته شده است. با این وجود، زمان نمونه‌برداری همیشه به عنوان پارامتر تنظیم مطرح نیست چون در اغلب کاربردهای عملی زمان نمونه‌برداری توسط محدودیت‌های موجود در سیستم سخت افزار به کاربر تحمیل می‌شود.

افق پیش‌بینی. اگر حد پایین افق پیش‌بینی مقدار بزرگی انتخاب شود، به این معنی است که خطا در زمان‌های اولیه مهم نیست و این باعث کند شدن پاسخ در حالت گذرا می‌شود. هم‌چنین این حد اگر کوچک‌تر از میزان تأخیر سیستم انتخاب شود تأثیری در بهینه‌سازی نخواهد داشت. در سیستم‌های پایدار، زمان نشست سیستم حلقه باز برای حد بالای افق پیش‌بینی در نظر گرفته می‌شود.

ماتریس دینامیکی از پاسخ پله برای پیش‌بینی استفاده می‌کند. برای سیستم پایدار تک ورودی-تک خروجی داریم:

$$y_m(n) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(n-i) \quad (1)$$

که در آن $y_m(n)$ و $u(n)$ به ترتیب خروجی مدل و سیگنال کنترلی در لحظه نمونه‌برداری n هستند، g_i نامین پاسخ پله سیستم و $\Delta u(n) = u(n) - u(n-1)$ با توجه به رابطه (۱) می‌توان پیش‌بینی j گام جلوتر خروجی سیستم را در لحظه نمونه‌برداری n به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \hat{y}_p(n+j|n) &= \sum_{i=1}^j g_i \Delta u(n+j-i) \\ &+ \sum_{i=j+1}^{\infty} g_i \Delta u(n+j-i) + d(n) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن $d(n) = y_p(n) - y_m(n)$ عبارت تصحیح کننده و در برگیرنده نامعنی‌ها و اغتشاش‌ها است که بهترین پیش‌بینی آن در آینده، مقدار کنونی آن است. $y_p(n)$ خروجی سیستم در لحظه نمونه‌برداری n است. به این ترتیب رابطه (۲) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\hat{y}_p(n+j|n) = \sum_{i=1}^j g_i \Delta u(n+j-i) + f(n+j) \quad (3)$$

که در آن $f(\cdot)$ پاسخ آزاد سیستم بوده و حاوی اطلاعات گذشته و کنونی سیستم است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f(n+j) = \sum_{i=1}^N (g_{i+j} - g_i) \Delta u(n-i) + y_p(n) \quad (4)$$

که در آن N افق مدل است و $g_{i+j} - g_i \approx 0, i > N$ حال در طول افق پیش‌بین، پیش‌بینی خروجی سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\hat{y}_p(n) = \begin{bmatrix} \hat{y}_p(n+1|n) \\ \hat{y}_p(n+2|n) \\ \vdots \\ \hat{y}_p(n+P|n) \end{bmatrix}_{P \times 1} = G \Delta u(n) + f(n) \quad (5)$$

که در آن

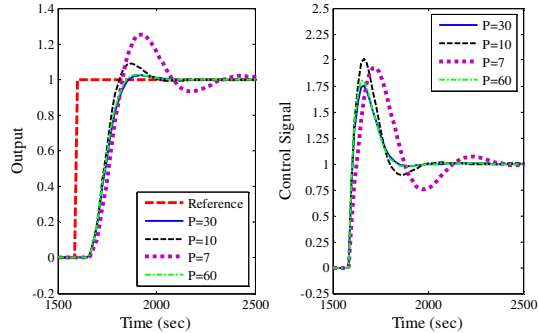
$$\Delta u(n) = \begin{bmatrix} \Delta u(n) \\ \Delta u(n+1) \\ \vdots \\ \Delta u(n+M-1) \end{bmatrix}, \quad f(n) = \begin{bmatrix} f(n+1) \\ f(n+2) \\ \vdots \\ f(n+P) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ g_M & g_{M-1} & \dots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_P & g_{P-1} & \dots & g_{P-M+1} \end{bmatrix}$$

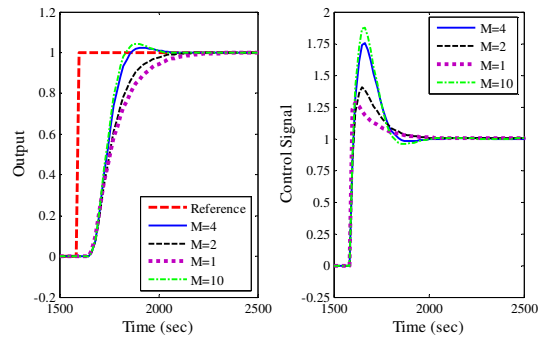
و P افق پیش‌بین، M افق کنترل و G ماتریس دینامیکی^۳ نام دارد. اکنون مسأله بهینه سازی زمان محدود زیر را در نظر بگیرید:

¹ Free Response
² Model Horizon
³ Dynamic Matrix

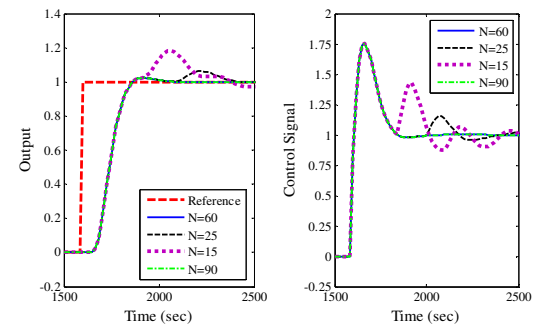
می‌دهد که این پارامتر، پارامتر مناسبی برای تنظیم نیست و بهتر است مقدار مناسبی برای آن در نظر گرفته شود. در شکل ۴ تأثیر تغییر پارامتر وزنی موجود در تابع معیار به عنوان با اهمیت‌ترین پارامتر قابل تنظیم این کنترل‌کننده دیده می‌شود.



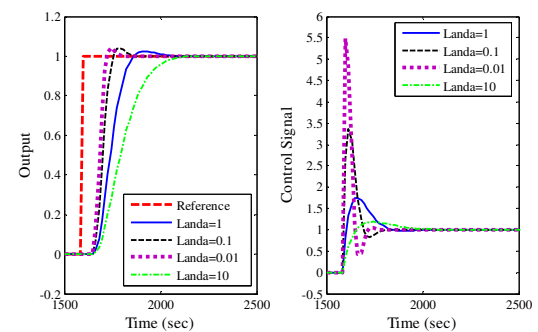
شکل ۱: تأثیر افق پیش‌بینی بر پاسخ سیستم حلقه بسته.



شکل ۲: تأثیر افق کنترل بر پاسخ سیستم حلقه بسته.



شکل ۳: تأثیر افق مدل بر پاسخ سیستم حلقه بسته.



شکل ۴: تأثیر پارامتر وزنی موجود در تابع معیار بر پاسخ سیستم حلقه بسته.

افق کنترل. افق کنترل میزان درجه آزادی کنترل‌کننده است و حداکثر می‌تواند برابر با افق پیش‌بینی باشد. حد پایین افق کنترل برای سیستم‌های پایدار، برابر یک است. برای سیستم‌های دینامیکی ساده که با مدل مرتبه اول با تأخیر^۱ توصیف می‌شوند، عملکردهای مطلوب قابل حصول، با افق کنترل یک به دست می‌آید [۱۸]. ولی برای سیستم‌های پیچیده‌تر عملکرد مطلوب با یک درجه آزادی قابل دستیابی نیست.

ماتریس‌های وزنی در تابع معیار. این پارامترها تأثیر گذارترین پارامترها در پایداری، عملکرد و مقاومت سیستم حلقه بسته هستند [۱۹]. ماتریس‌های وزنی در مقیاس^۲ کردن خطاهای پیش‌بینی و تغییرات سیگنال‌های کنترلی، جلوگیری از بدخیمی^۳ در محاسبه سیگنال کنترلی [۱۹] و محدود کردن سیگنال کنترلی نقش دارند.

قطب فیلتر نرم‌کننده ورودی مرجع. در عمل، ورودی مرجع بعد از عبور از یک فیلتر به سیستم اعمال می‌شود. این فیلتر غالباً یک فیلتر پایین گذر با یک قطب و بهره حالت ماندگار واحد بوده و محل قطب فیلتر یکی از پارامترهای تنظیم است.

۲-۱ بررسی تأثیر پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی در پاسخ سیستم حلقه بسته

در این بخش تأثیر پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی برای سیستم خطی تک ورودی- تک خروجی با شبیه‌سازی مطالعه گردیده و نکاتی در مورد هر پارامتر و تأثیر آن بیان شده است. سیستم زیر را در نظر بگیرید [۱۹]:

$$G_p(s) = \frac{e^{-50s}}{(150s + 1)(25s + 1)} \quad (9)$$

فرض کنیم بین مدل و فرآیند اختلافی وجود نداشته باشد، یعنی $G_m(s) = G_p(s)$. در این مقاله اندیس m و p به ترتیب برای نشان دادن مدل و فرآیند واقعی به کار گرفته شده است. در [۱۹] برای سیستم فوق زمان نمونه برداری $T_s = 16 \text{ sec}$ پیشنهاد شده است که مناسب می‌باشد. مقادیر زیر برای پارامترهای تنظیم انتخاب شده است:

$$N = 60, P = 30, M = 4, \lambda = 1 \quad (10)$$

فیلتر ورودی مرجع نیز در نظر گرفته نمی‌شود. برای نشان دادن تأثیر هر پارامتر، آن پارامتر را تغییر داده و مابقی پارامترها در همان مقدار نامی داده شده در رابطه (۱۰) ثابت نگه داشته می‌شوند. در شکل ۱، ۲ و ۳ به ترتیب تأثیر تغییر افق پیش‌بینی، کنترل و مدل دیده می‌شود. افزایش افق پیش‌بینی پایداری بیشتری ایجاد می‌کند. هم‌چنین دیده می‌شود که با کم شدن افق کنترل سرعت پاسخ سیستم حلقه بسته کاهش می‌یابد. در شکل ۳ دیده می‌شود که با کم کردن افق مدل پاسخ سیستم حلقه بسته از حالت مطلوب خارج می‌شود چون فرض $g_{i+j} - g_i \approx 0, i > N$ نقض می‌شود. بیشتر از حد زیاد شدن آن نیز بی‌تأثیر است. این نکته نشان

1- First Order plus Dead Time (FOPDT) Models

2- Scaling

3- ill-condition

۲-۳ دسته‌بندی روش‌های تنظیم پارامترهای

کنترل‌کننده‌های پیش‌بین

بررسی روش‌های تنظیم ارائه شده از سال ۱۹۸۰ تا سال ۱۹۹۴ در [۱۳] و کارهای جدیدتر تا سال ۲۰۰۹ در [۱۴] مرور شده‌اند. در [۱۵] روش‌های تنظیم ارائه شده برای کنترل ماتریس دینامیکی آمده است. در [۱۴] بررسی بر اساس پارامترهای تنظیم است و نویسندگان برای هر پارامتر قابل تنظیم، کارهای ارائه شده را معرفی نموده‌اند. دیدگاهی که در این مقاله در پیش گرفته شده است بر اساس ماهیت روش تنظیم است. با توجه به این که نقش پارامترهای وزنی در تابع معیار نسبت به دیگر پارامترهای قابل تنظیم بیشتر است، دسته‌بندی که ارائه می‌شود نیز بر اساس روش تنظیم ارائه شده برای این پارامترها است. روش‌های تنظیم را به صورت کلی زیر تقسیم‌بندی کرده‌ایم:

- روش‌های متفرقه تنظیم:
 - ✓ روش‌های تجربی بر اساس سعی و خطا،
 - ✓ روش‌های تنظیم با در نظر گرفتن سیستم‌های خاص،
 - ✓ روش‌های تنظیم برای کنترل‌کننده‌های پیش‌بین خاص و یا پارامترهای خاص،
- تنظیم بر پایه روش‌های عددی و محاسبات نرم.
- فرمول‌های بسته تنظیم:
 - ✓ مبتنی بر روش‌های تجربی،
 - ✓ روش‌های بر پایه‌های نظری:
 - روش‌های آماری،
 - روش‌های تحلیلی.

در این دسته‌بندی، دسته آخر که عبارات تحلیلی برای تنظیم ارائه می‌کنند اهمیت بیشتری دارند زیرا فرمول‌های داده شده در تحلیل رفتار سیستم حلقه بسته اهمیت دارند.

۳- روش‌های متفرقه تنظیم

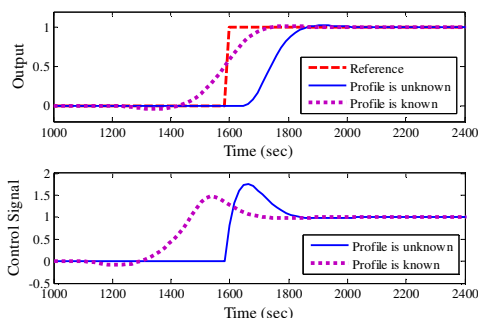
در این بخش ابتدا روش‌هایی معرفی می‌شوند که فقط به ارائه دستورالعمل‌ها و نکات کلی در مورد تنظیم پارامترها و یا تأثیر آن‌ها بر پایداری، عملکرد و مقاومت سیستم بسنده کرده‌اند. سپس به مطالعاتی اشاره می‌شود که مسأله تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین را برای یک سیستم خاص و یا روش‌های خاص کنترل پیش‌بین و پارامترهای خاص این کنترل‌کننده حل کرده‌اند.

۳-۱ روش‌های تجربی بر اساس سعی و خطا

در بحث تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین، دسته‌ای از مطالعات به صورت تجربی به ارائه مطالبی نکته‌وار و کلی در مورد پارامترها پرداخته‌اند. در این بخش به مطالعه تعدادی از کارهای برجسته در این دسته از روش‌ها می‌پردازیم.

اولین ایده مطرح شده برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین مربوط به سال ۱۹۸۰ است [۲۰]. برای کنترل‌کننده‌های پیش‌بین تک ورودی-

شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش پارامتر وزنی موجب کند شدن سرعت پاسخ سیستم حلقه بسته و کاهش تغییرات سیگنال کنترلی می‌شود. در شکل‌های ۱ تا ۴ فرض شده است ورودی مرجع از قبل مشخص نباشد. در شکل ۵ پاسخ سیستم حلقه بسته در حالتی که آینده پروفایل ورودی مرجع مشخص باشد با حالتی که آینده ورودی مرجع وجود نداشته باشد، مقایسه شده است. دیده می‌شود که لختی و تأخیر سیستم تا حدی جبران گردیده است و هم‌چنین به دلیل اضافه شدن صفرهای خارج از دایره واحد توسط کنترل‌کننده، پاسخ غیرمی‌نیم فاز شده است.

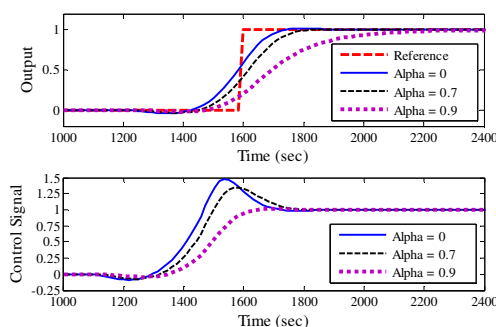


شکل ۵: تأثیر استفاده از اطلاعات آینده پروفایل ورودی مرجع.

در شکل ۶ تأثیر فیلتر نرم‌کننده ورودی مرجع دیده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، این فیلتر باعث کند شدن پاسخ سیستم حلقه بسته و نرم شدن سیگنال کنترلی می‌شود. داریم:

$$w(n) = \frac{1 - \alpha}{z - \alpha} w_1(n) \quad (11)$$

که در آن $w(n)$ سیگنال نرم شده ورودی مرجع $w_1(n)$ است و α قطب فیلتر است.



شکل ۶: تأثیر فیلتر نرم‌کننده (آینده پروفایل ورودی مرجع مشخص است).

جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی‌ها به صورت زیر است:

- پارامتر وزنی تأثیر زیادی بر پاسخ حلقه بسته دارد و به عنوان موثرترین پارامتر قابل تنظیم مطرح است.
- افق کنترل و افق پیش‌بینی به عنوان پارامترهای قابل تنظیم تأثیر محدودی بر سیستم حلقه بسته دارند و حد بالایی برای آن‌ها وجود دارد.
- افق مدل پارامتر مناسبی برای تنظیم نیست و مقدار آن باید مناسب انتخاب شود.

$$\lambda_{opt} \approx 500k^{1.5} \quad (12)$$

که در آن k بهره حالت ماندگار سیستم حلقه باز را نشان می‌دهد. با توجه به این که به حد فاز بالا نیاز است، افق کنترل یک در نظر گرفته شده است و افق پیش‌بینی هم بر اساس زمان خیز سیستم حلقه باز انتخاب شده است. در [۲۷] برای کنترل سیستم چندمتغیره فشار از کنترل ماتریس دینامیکی استفاده شده است. در این مقاله برای تنظیم افق کنترلی و ماتریس‌های وزنی روشی به نام روش سطوح پاسخ^۴ ارائه شده است. [۲۸] برای کنترل فرآیند تولید پنسیلین^۵ از کنترل پیش‌بین تعمیم یافته بهره گرفته و روش تنظیمی با بررسی حساسیت انتگرال قدر مطلق خطا نسبت به پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده ارائه کرده است. در [۲۹] از روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تنظیم ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی کنترل‌کننده پیش‌بین تعمیم یافته برای کنترل فرآیند pH استفاده شده و با پیاده‌سازی عملی نتایج روش تنظیم ارائه شده از دید انواع خطاهای ردیابی بررسی شده است. در [۳۰] تنظیم پارامتر وزنی کنترل پیش‌بین تعمیم یافته برای کنترل سرعت سیستم راه اندازی^۶ مطرح شده است. در این مقاله به منظور افزایش مقاومت کنترل‌کننده، فیلتر نویز به مدل کنترل‌کننده افزوده شده و با در نظر گرفتن مقادیری تجربی برای این فیلتر، نتایج پیاده‌سازی آن در مقاله آورده شده است. کنترل شبکه انتقال آب آشامیدنی با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین چندمتغیره در [۳۱] بررسی شده است. در این مرجع تنظیم افق پیش‌بینی و وزن‌های موجود در تابع هزینه با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس قوانین فازی انجام شده است. در [۳۲] کنترل مبدل چهار مرحله‌ای^۷ با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین ارائه شده است که برای انتخاب عوامل وزنی مناسب، از معیار میانگین حاصل جمع مجذور خطای ردیابی استفاده شده است. در [۳۳] هدف کنترل ستون تقطیر با دو ورودی و دو خروجی است و تأثیر پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده پیش‌بین بر پاسخ سیستم حلقه بسته از طریق شبیه‌سازی بررسی شده است. کنترل سیستم ترکیبی^۸ باتری خودرو در [۳۴] مطرح شده است. کنترل‌کننده پیش‌بین با فرض افق پیش‌بینی بینهایت برای کنترل این سیستم در نظر گرفته شده و بر این اساس فرمول‌های تنظیمی ارائه شده است.

۳-۳ روش‌های تنظیم برای کنترل‌کننده‌های پیش‌بین

خاص و یا پارامترهای خاص

در کنار روش‌های معروفی مانند کنترل ماتریس دینامیکی و کنترل پیش‌بین تعمیم یافته روش‌های خاص دیگری نیز معرفی شده‌اند. برای برخی از این روش‌ها، روش‌های تنظیمی ارائه شده است. برای نمونه، [۳۵] کنترل پیش‌بین ساده شده^۹ را ارائه و روشی برای تنظیم پارامترهای

تک خروجی، پیشنهاد نرمالیزه کردن ضریب وزنی λ نسبت به بهره سیستم به صورت $\lambda = fk^2$ (که در آن k بهره سیستم حلقه باز است) اولین بار در [۲۰] ارائه شده است. این نرمالیزه کردن بسیار کاربردی بوده و پاسخ حلقه بسته را مستقل از بهره سیستم حلقه باز می‌کند. هم‌چنین اولین راهکار پیشنهادی برای تنظیم پارامترهای کنترل ماتریس دینامیکی روش‌های سعی و خطای روشمند بوده است که در [۲۱] مطرح شده است. [۲۲] جز اولین مقالات در زمینه بررسی تأثیر پارامترهای کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی بر پایداری سیستم حلقه بسته است. در این مقاله شرایط لازم و یا کافی را برای مقدار افق‌ها برای پایداری سیستم حلقه بسته بیان می‌کند. در [۲۳] تنظیم کنترل‌کننده پیش‌بین تعمیم یافته بیان شده است و تأثیر کم و یا زیاد کردن هر کدام از پارامترها بر پاسخ سیستم حلقه بسته بررسی شده است. در این مقاله، برای حد بالای افق پیش‌بینی بازه تأخیر سیستم تا زمان نشست پاسخ پله حلقه باز پیشنهاد شده است. هم‌چنین ذکر شده است که در انتخاب ضریب وزنی باید مصالحه‌ای بین عملکرد ردیابی و تغییرات سیگنال کنترلی انجام پذیرد. در این مقاله به نرمالیزه کردن ضریب وزنی نیز اشاره شده است و برای انتخاب آن یک مقدار اولیه نیز پیشنهاد شده است. در بسیاری از کتاب‌های کنترل پیش‌بین نیز مطالبی در مورد تنظیم پارامترها آمده است. برای مثال [۲۴] به صورت سرانگشتی قوانینی برای پارامترهای کنترل ماتریس دینامیکی آورده است. در [۴] نیز نکاتی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین تعمیم یافته بیان شده است. به عنوان مثال نویسنده در [۴] ذکر کرده است که افق کنترل باید بزرگ باشد و اختلاف افق پیش‌بینی و افق کنترل باید از زمان نشست سیستم حلقه باز بزرگ‌تر باشد. در [۲۵] ابتدا به بررسی چند روش تنظیم ارائه شده برای کنترل ماتریس دینامیکی پرداخته شده است. سپس تأثیر پارامترهای قابل تنظیم بر مسیر حرکت قطب‌های حلقه بسته با شبیه‌سازی بر روی یک سیستم مرتبه دوم مطالعه شده است. این کنترل‌کننده حل کرده‌اند.

۲-۳ روش‌های تنظیم با در نظر گرفتن سیستم‌های خاص

در این بخش مراد بررسی قرار داده می‌شود که مسأله تنظیم کنترل پیش‌بین را برای یک سیستم خاص حل نموده‌اند و به صورت عملی یا شبیه‌سازی روش خود را روی سیستم مد نظر پیاده‌سازی کرده‌اند. اولین کاری که در این دسته قرار می‌گیرد مربوط به سال ۱۹۹۲ است که در آن مسأله‌ی تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین تعمیم یافته برای سیستم کنترل عددی کامپیوتری^۱ مطرح شده است [۲۶]. اهداف تنظیم در این مقاله رسیدن به حد فاز^۲ بیشتر از ۴۵ درجه و حد بهره^۳ بیشتر از ۸dB است. تأثیر افق پیش‌بین و ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی بر حد بهره و حد فاز بررسی شده و فرمولی تجربی برای ضریب وزنی λ برای سیستم مدنظر به صورت زیر ارائه شده است:

^۴ - Response Surface Method

^۵ - Fed-batch Penicillin Production

^۶ - Driver

^۷ - Four-level flying-capacitor inverter

^۸ - Hybrid

^۹ - Simplified MPC (SMPC)

^۱ - Computer Numerical Control (CNC)

^۲ - Phase Margin

^۳ - Gain Margin

روابطی که در مقاله ارائه شده است تنظیم می‌شوند. پیشنهاد مقاله برای زمان اعمال سیگنال ورودی مرجع میزان تأخیر سیستم با ضافه مرتبه سیستم است. در [۴۰] پارامتری قابل تنظیم، مشابه با ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی برای قسمت ردیابی در تابع معیار تعریف شده است. به این صورت که داریم:

$$J = \sum_{i=1}^P (\hat{y}(k+i|k) - y_{ref}(k+i|k))^2 + \lambda \sum_{i=1}^{M-1} (\Delta u(k+i|k))^2 \quad (16)$$

$$y_{ref}(k+i|k) = y_{sp}(k) - \alpha^i (y_{sp}(k) - y(k))$$

که در آن $y(k)$ مقدار واقعی خروجی اندازه‌گیری شده است و $y_{sp}(k)$ ورودی مرجع است. در این فرمول α پارامتر قابل تنظیم جدیدی است. علاوه بر پارامتر نرم‌کننده ورودی مرجع، پارامتر دیگری نیز در مرجع [۴۱] به همین منظور مطرح گردیده است. در این مقاله نویسندگان برای نرم کردن تغییرات سیگنال کنترلی پارامتر β را تعریف می‌کنند:

$$\Delta u(t+1) = \left(1 + \sum_{i=1}^j \beta^i \right) \Delta u(t), \quad (17)$$

$$\text{for } j = 1, 2, \dots, M-1, \quad 0 \leq \beta \leq 1$$

نویسندگان ادعا کرده‌اند که تنظیم این پارامتر ساده‌تر از λ بوده و با دید فیزیکی تری امکان‌پذیر است.

۴- تنظیم بر پایه روش‌های عددی و محاسبات

نرم

با توجه به پیشرفت چشمگیر در محاسبات عددی و امکان انجام محاسبات پیچیده بهینه‌سازی، محققانی به استفاده از این ابزار در مسأله تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین پرداخته‌اند. در این بخش به بررسی روش‌های تنظیمی پرداخته می‌شود که با استفاده از روش‌های عددی و یا با استفاده از روش‌های محاسبات نرم مانند شبکه‌های عصبی، فازی، الگوریتم ژنتیک و دیگر روش‌های عددی بهینه‌سازی به تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین می‌پردازند.

۴-۱ - تنظیم مبتنی بر الگوریتم‌های عددی

در سال ۲۰۰۰ تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین تعمیم یافته به روش بهینه‌سازی چند هدفه با الگوریتم ژنتیک مطرح شد [۴۲]. در این مقاله پارامترهای مد نظر افق کنترل و پیش‌بینی، فیلتر مربوط به نویز در مدل و زمان نمونه‌برداری بوده و ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی صفر فرض شده است. دو معیار بهینه‌سازی به صورت هم‌زمان برای حالت گذرا و ماندگار در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی این معیارها با الگوریتم ژنتیک انجام پذیرفته است. محققان دیگری نیز از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده پیش‌بین تعمیم یافته استفاده نموده‌اند [۴۳].

این کنترل‌کننده پیشنهاد می‌دهد. در این روش به جای بهینه‌سازی در طول افق، بهینه‌سازی فقط در یک نقطه انجام می‌پذیرد یعنی:

$$\hat{y}(t+P_c) = w(t+P_c) \quad (13)$$

که در آن \hat{y} خروجی پیش‌بینی شده و w ورودی مرجع است. به این ترتیب داریم $M = P = 1, \lambda = 0$. برای این کنترل‌کننده، پارامتر قابل تنظیم نقطه تطابق P_c است که عددی طبیعی می‌باشد. در این مقاله تابع تبدیل کنترل‌کننده محاسبه شده و با رسم نمودارهای مربوط به پایداری مقاوم حلقه بسته و با کم و زیاد کردن مقدار P_c تا رسیدن به مقدار مطلوب، این پارامتر تنظیم می‌شود. یکی از ویژگی‌های ضریب وزنی تابع معیار کنترل پیش‌بین، جلوگیری از ویژه شدن ماتریس $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ است. برای جلوگیری از ویژه شدن، ماتریس دینامیکی انتقال یافته^۱ [۳۶] و کنترل پیش‌بین تعمیم یافته اصلاح شده^۳ [۳۷] مطرح شده است. در روش اول ستون اول ماتریس \mathbf{G} بدون تغییر نگه داشته می‌شود ولی ستون بعدی به پایین انتقال پیدا کرده و از بالا به آن صفر افزوده می‌شود. مابقی ستون‌ها نیز به همین ترتیب تشکیل می‌شوند. در این روش پارامتر تنظیم مقدار انتقال است که عددی صحیح بوده و ضریب وزنی وجود ندارد. در روش دوم از ماتریس غیرقطری زیر برای ماتریس وزنی استفاده می‌شود:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & -R_1\lambda & -\lambda & -R_1\lambda & -\lambda & \dots \\ -R_1\lambda & 0 & -R_2\lambda & -\lambda & -R_2\lambda & \dots \\ -\lambda & -R_2\lambda & 0 & -R_2\lambda & -\lambda & \dots \\ -R_1\lambda & -\lambda & -R_2\lambda & 0 & -R_2\lambda & \dots \\ -\lambda & -R_2\lambda & -\lambda & -R_2\lambda & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (14)$$

این نوع وزن‌دهی اشکال مفهومی دارد زیرا عناصر قطری که نقش محدودکنندگی در تغییرات سیگنال کنترلی دارند در این فرمول صفر در نظر گرفته شده است. در [۳۸] برای سیستم مرتبه دوم با تأخیر روابط بازگشتی در ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین ارائه شده است که حجم محاسبات را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. در این مقاله سعی شده است که پارامترهای جدید کنترل‌کننده بر حسب پارامترهای مدل و ضریب وزنی نوشته شود. با توجه به ساده نبودن ارتباط پارامترهای جدید و ضریب وزنی، این پارامترها با توابعی غیرخطی از ضریب وزنی تخمین زده شده‌اند و روشی برای تنظیم آن‌ها بیان شده است.

همان‌طور که اشاره شد، مطالعاتی نیز وجود دارد که پارامترهای جدیدی معرفی کرده و سعی در تنظیم این پارامترها دارند. به عنوان مثال در [۳۹] تکیه اصلی روی سیگنال ورودی مرجع است. برای ورودی مرجع یک فیلتر پایین‌گذر به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\frac{1 - az^{-1}}{(1 - \alpha)(a + bz^{-1})}, \quad a + b = 1 \quad (15)$$

علاوه بر این، در این مرجع تنظیم زمان اعمال سیگنال ورودی مرجع نیز در نظر گرفته شده است. پارامترهای فیلتر فوق با توجه به زمان نشست و

¹- Coincidence Point

²- Shifted Dynamic Matrix Control (Shifted DMC)

³- Modified GPC

غیر خطی چندمتغیره مقید مطرح شده است. برای تنظیم پارامترها از قوانین فازی استفاده می‌شود. در [۵۲] بحث تنظیم خودکار کنترل پیش‌بین چندمتغیره مطرح شده است. در این مقاله، تنظیم مقاوم کنترل‌کننده نسبت به نامعینی با استفاده از روش min-max مد نظر است و برای بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات بهره گرفته شده است. در [۵۳] از روش گرادیان نزولی برای بروز رسانی پارامترهای تنظیم استفاده شده است. در این تنظیم افق‌ها و ماتریس‌های وزنی تنظیم می‌شوند.

۴-۲ - تنظیم برپایه مهندسی معکوس

تعدادی از محققان نیز از ایده مهندسی معکوس^۳ استفاده کرده‌اند و به صورت عددی روشی برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده پیش‌بین ارائه نموده‌اند. در این روش‌ها هدف تنظیم کنترل‌کننده پیش‌بین به نحوی است که این کنترل‌کننده به مانند یک کنترل‌کننده خطی ساده رفتار نماید. با معادل‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین با کنترل‌کننده‌های ساده‌تر این امکان ایجاد می‌شود که به جای تحلیل کنترل‌کننده پیش‌بین، کنترل‌کننده معادل تحلیل گردد. در این دسته از روش‌ها فرض معادل بودن کنترل‌کننده‌ها فقط زمانی مطرح است که قیده‌ها غیرفعال باشند. اولین کار در این دسته از روش‌ها در [۵۴] ارائه شده است. هدف این مقاله هدف آن است که در حالت غیرفعال بودن قیده‌ها، تابع معیار و بهره تخمین زن حالت کنترل‌کننده پیش‌بین طوری تعیین شود که رفتار کنترل‌کننده به مانند یک کنترل‌کننده مرتبه پایین و ساده‌تر باشد. با فرض افق پیش‌بین بینهایت روابطی برای تنظیم بدست آمده است. این ایده در [۵۵] تکمیل‌تر شده است. هم‌چنین ایده این دو مقاله در [۵۶] مورد استفاده قرار گرفته و بیشتر تاکید بر روی رویت‌گر و طراحی رویت‌گر مرتبه پایین است. در مراجع مذکور، فیدبک حالت مد نظر بوده ولی اخیراً در [۵۷] بحث فیدبک حالت به فیدبک خروجی نیز تعمیم داده شده است. در کنار روش‌های مطرح شده که بر پایه طراحی رویت‌گر هستند، روش‌هایی هم ارائه شده‌اند که فرض دسترسی به متغیرهای حالت را دارند. در [۵۸] بحث تطابق کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین با کنترل‌کننده فیدبک حالت مطرح شده است. در این مقاله نویسندگان بر این تلاش‌اند که ماتریس‌های وزنی کنترل‌کننده پیش‌بین را به گونه‌ای تنظیم نمایند که به رفتاری مشابه کنترل‌کننده فیدبک حالت با بهره دلخواه داده شده برسند. این کار توسط تبدیل مسأله تطابق کنترل‌کننده‌ها به یک مسأله نامعادله ماتریسی خطی^۴ حل شده است. ایراد وارد بر روش‌های ارائه شده در این مقاله، حجم محاسباتی بالا و تضمین نشدن امکان‌پذیری^۵ مسأله است. در [۵۹] کار مشابهی با مسأله تطابق کنترل‌کننده‌ها انجام شده است با این تفاوت که سیستم از دید ورودی-خروجی در نظر گرفته شده است. در این مقاله کنترل‌کننده پیش‌بین تعمیم یافته مد نظر بوده و نویسندگان بر این تلاش هستند

در [۴۳] بیشتر تمرکز بر روی افق‌ها بوده و اشاره شده است که بر اساس دانشی که از سیستم داریم باید انتخاب شود. معیاری که برای تنظیم در نظر گرفته شده است علاوه بر می‌نیم سازی خطا و تلاش کنترلی، افق‌های پیش‌بینی و کنترل را نیز می‌نیم می‌کند. در [۴۴] روش تنظیمی برای کنترل‌کننده‌های پیش‌بین با استفاده از تلفیق الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی چندهدفه با تصمیم‌گیری فازی ارائه شده است. به وسیله روش ارائه شده در این مقاله به تنظیم ماتریس‌های وزنی کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی برای سیستم‌های چندمتغیره مقید پرداخته شده است. الگوریتم تکاملی ذهنی^۱ برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده پیش‌بین در [۴۵] بکار گرفته شده است. افق کنترل و پیش‌بینی و وزن‌های موجود در تابع معیار پارامترهای مد نظر این مقاله هستند. برای تنظیم نیز علاوه بر تابع معیار متداول کنترل‌کننده پیش‌بین، عبارت‌هایی برای محدود کردن فراجش و بهبود مقاومت کنترل‌کننده و هم‌چنین سرعت‌دهی مناسب به پاسخ سیستم حلقه بسته وجود دارد. [۴۶] بهینه‌سازی چند هدفه را برای تنظیم کنترل‌کننده پیش‌بین چندمتغیره مقید مطرح کرده است و هدف آن عملکرد مقاوم کنترل‌کننده است. با در نظر گرفتن توابع حساسیت چندگانه در حوزه فرکانس و می‌نیم‌سازی چنین توابعی تنظیم حاصل می‌گردد. برای تنظیم افق‌ها از جستجوی تصادفی استفاده شده است و برای ضرایب وزنی از روش برنامه‌ریزی مربعی سلسله‌مراتبی^۲ بهره گرفته شده است. در [۴۷] با استفاده از بهینه‌سازی اجتماع ذرات برای کنترل‌کننده پیش‌بین چندمتغیره مقید، روش تنظیمی ارائه شده است که عملکرد مقاوم دارد. در این روش فرض می‌شود که سیستم متعلق به یک مجموعه از سیستم‌ها باشد و برای بدترین حالت تنظیم انجام می‌شود. در [۴۸] به بحث تنظیم کنترل ماتریس دینامیکی پرداخته شده و هدف رسیدن به میزان مشخصی از فراجش در سیگنال کنترلی است. در این مرجع تنظیم ماتریس وزنی کنترل ماتریس دینامیکی چندمتغیره مد نظر است و هدف تنظیم آن دستیابی به میزان مشخصی از فراجش در سیگنال کنترلی است که برای این کار از روش بهینه‌سازی Simplex استفاده شده است. اغلب روش‌های ارائه شده تنظیم، برای سیستم‌های خطی بوده و خیلی کم به تنظیم کنترل پیش‌بین غیرخطی پرداخته شده است. از معدود مراجعی که جدیداً به این مسأله پرداخته است می‌توان به [۴۹] اشاره کرد. در این مقاله، تنظیم بر اساس بهینه‌سازی چندهدفه انجام می‌شود.

تمام روش‌های تنظیمی که تا به این‌جا معرفی شده‌اند، به صورت خارج از خط هستند. اما در زمینه تنظیم بر خط پارامترهای کنترل پیش‌بین نیز تعداد معدودی کار وجود دارد. در [۵۰] روش تنظیمی به صورت بر خط برای ماتریس‌های وزنی کنترل‌کننده پیش‌بین مقید ارائه شده است. با محاسبه حساسیت پیش‌بینی انجام شده نسبت به پارامترهای قابل تنظیم، فرمول‌های تنظیم ارائه شده است. در [۵۱] بحث تنظیم روی خط کنترل‌کننده پیش‌بین

³- Inverse engineering

⁴- Linear Matrix Inequality (LMI)

⁵- Feasibility

¹- Mind Evolutionary Algorithm (MEA)

²- Sequential Quadratic Programming (SQP)

$$\lambda_i = 9 \left(1 + \frac{6\theta_i}{P} + \frac{3k_i\theta_i}{P} \right)^2 \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (20)$$

که در آن θ_i و k_i به ترتیب تأخیر و بهره برای مدل از ورودی i به خروجی‌ها و P افق پیش‌بینی است. ایراداتی به این فرمول وارد است [۶۴]. از جمله این‌که برای بهره‌های خیلی کمتر از یک و خیلی بیشتر از یک عملکرد بسیار متفاوتی دارد. در [۶۵] روشی تجربی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین تعمیم یافته بیان شده است. برای حد پایین افق پیش‌بینی، حد بالای آن و افق کنترل به ترتیب مقدار تأخیر، سه برابر تأخیر و برابر با مقدار تأخیر سیستم پیشنهاد شده است. این انتخاب‌ها برای سیستم‌های بدون تأخیر دچار مشکل می‌شود. مدل زیر برای سیستم در نظر گرفته شده است:

$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_m z^{-m}} z^{-d} \quad (21)$$

انتخاب λ به این صورت است که b_1 به ۱۰ چندین بار ضرب یا تقسیم می‌شود تا عددی در بازه [0.9, 9] بدست آید. این عدد بدست آمده برای λ در نظر گرفته می‌شود. بارزترین ایراد وارده به این انتخاب، نرمالیزه نکردن λ نسبت به بهره حالت ماندگار مدل است.

۵-۲ - روش‌های مبتنی بر پایه‌های نظری (روش‌های

آماري)

سال ۲۰۰۶ ایده‌ای برای تنظیم ضریب وزنی کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی ارائه شد که بر مبنای استفاده از ابزاری به نام تحلیل واریانس^۱ است [۶۶]. تحلیل واریانس برای یک سری از داده‌های ورودی و خروجی میزان تأثیر و اهمیت داده‌های ورودی و یا ترکیبی از داده‌های ورودی را بر داده‌های خروجی مشخص می‌کند. در این مقاله از مدل مرتبه اول با تأخیر (۱۸) استفاده می‌شود و برای تنظیم معیاری برای عملکرد به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| + \Gamma |u(t)| dt \quad (22)$$

که در آن Γ پارامتر طراحی است. مجموعه پارامترهای مدل یعنی k, τ, θ و پارامتر Γ در نظر گرفته شده و برای هر دسته مقدار ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی بهینه λ_{opt} که معیار (۲۲) را بهینه می‌کند، محاسبه می‌شود. سپس برای مجموعه $(k, \tau, \theta, \Gamma, \lambda_{opt})$ تحلیل واریانس انجام می‌شود. بر اساس این تحلیل و سعی و خطا، فرمولی بسته به صورت زیر ارائه شده است:

$$\lambda = 1/631k \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{0.4094} \quad (23)$$

به این فرمول ایرادهایی وارد است که در [۶۴]، [۶۷] و [۶۸] بیان شده است. از جمله می‌توان به متناسب بودن بهره با ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی و عدم وجود پارامتر Γ در فرمول اشاره کرد. در [۶۸] به

که با استفاده از روش بهینه‌سازی محدب، ماتریس‌های وزنی کنترل‌کننده را به نحوی تنظیم نمایند که قطب و صفرهای سیستم حلقه بسته کم‌ترین اختلاف را با مقادیر مطلوب داشته باشد. در این مقاله افق کنترل یک فرض شده است. ایده این مقاله به سیستم‌های چندمتغیره نیز تعمیم داده شده است [۶۰]. هم‌چنین در [۶۱] مشکل فرض افق کنترل یک که در دو مقاله [۵۹] و [۶۰] بود حل شده است و هم‌چنین بحث‌هایی در مورد انتخاب قطب و صفرهای مطلوب سیستم حلقه بسته شده است چون هر انتخابی مجاز نبوده و ممکن است مسأله بهینه‌سازی جواب مناسبی ندهد.

۵- فرمول‌های بسته تنظیم

در این بخش روش‌های فرمول بسته برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌های پیش‌بین ارائه می‌شوند. پاره‌ای از این روش‌ها مبتنی بر روش‌های تجربی و آزمون و خطا و پاره‌ای بر پایه‌های نظری استوارند. روش‌های مبتنی بر پایه‌های نظری، به روش‌های آماری و تحلیلی تقسیم‌بندی می‌شود. از آن‌جا که روش‌های مبتنی بر پایه‌های نظری اهمیت فراوانی دارند، با جزئیات بیشتری به آن‌ها می‌پردازیم.

۵-۱ - فرمول‌های بسته مبتنی بر روش‌های تجربی و

آزمون و خطا

در چندین مرجع با سعی و خطا و یا به صورت تجربی فرمول‌های بسته‌ای برای ضریب یا ماتریس‌های وزنی تابع معیار کنترل‌کننده پیش‌بین ارائه شده است. اولین مرجع در این دسته [۶۲] است که برای پارامترهای کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی تک ورودی- تک خروجی مقادیری پیشنهاد داده است. فرض می‌شود که سیستم با مدل مرتبه اول با تأخیر زیر تقریب زده شده است:

$$G(s) = \frac{ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (18)$$

برای افق مدل و پیش‌بینی مقدار $P = M = \frac{5\tau + \theta}{T_s}$ و برای پارامتر وزنی $\lambda = 10k^2$ داده شده است و ادعا شده که این λ به پاسخ حلقه بسته سریع و ۱۰ تا ۱۵ درصد فراجهد منجر می‌شود. این انتخاب ساده، کاربری آن را آسان می‌سازد ولی مستقل بودن آن نسبت به تأخیر و ثابت زمانی محدودیت این فرمول است. در [۶۳] تنظیم کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی چندمتغیره بررسی شده است. در این مقاله آمده است که بایستی اندازه افق پیش‌بینی بزرگ انتخاب شود تا بزرگ‌تر شدن آن تأثیری بر سیگنال کنترلی نداشته باشد. برای سیستم چندمتغیره، ماتریس وزنی تغییرات سیگنال کنترلی به صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$R = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \mathbf{0} \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \lambda_S \end{bmatrix} \quad (19)$$

که در آن S تعداد سیگنال‌های کنترلی، $\mathbf{0}$ ماتریسی با عناصر صفر و ابعاد مناسب است و داریم:

^۱ - Analysis of Variance (ANOVA)

این مرجع به مانند مراجع [۶۶] تا [۷۰] بوده و برای کلاس خاصی از سیستم های با دو ورودی و دو خروجی فرمول تنظیم ارائه گردیده است.

۳-۵ - روش های مبتنی بر پایه های نظری (روش های

تحلیلی)

اولین کارهای تحلیلی در حوزه تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین در سال ۱۹۷۷ انجام شده است [۱۹] و [۷۲]. در این مراجع برای تمامی پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده تک ورودی- تک خروجی کنترل ماتریس دینامیکی روابط تحلیلی ارائه شده است. این روابط با در نظر گرفتن مدل مرتبه اول با تأخیر برای سیستم واقعی به دست آمده است. تنظیم به قصد جلوگیری از بدخیم شدن ماتریس دینامیکی انجام پذیرفته است. نویسندگان با مثال هایی نشان داده اند که تأثیر ضریب وزنی بر عملکرد سیستم بیش تر است. در این مقاله ها برای زمان نمونه برداری داریم:

$$T_s = \max(0.1\tau, 0.5\theta) \quad (29)$$

برای افق های پیش بینی و مدل نیز داریم:

$$P = N = \frac{5\tau}{T_s} + b, \quad b = \text{int}\left(\frac{\theta}{T_s}\right) + 1 \quad (30)$$

این انتخاب برای افق پیش بینی مناسب است اما افق مدل بایستی بزرگ تر انتخاب گردد [۶۴]. در این مراجع افق کنترل عددی بین ۲ تا ۶ پیشنهاد می شود. سپس به اثبات نرمالیزه کردن ضریب وزنی تغییرات سیگنال کنترلی یعنی $\lambda = fk^2$ که در آن f مستقل از k است، پرداخته شده است. با تقریب هایی مناسب و با در نظر گرفتن مقدار ۵۰۰ برای عدد شرطی ماتریس $(G^T G + \lambda I)$ ، فرمول تنظیم زیر پیشنهاد شده است:

$$\lambda = fk^2, \quad f = \frac{M}{500} \left(\frac{7\tau}{2T_s} + 2 - \frac{M-1}{2} \right) \quad (31)$$

همین نویسندگان روش ارائه شده را به سیستم های چند ورودی- چند خروجی نیز تعمیم داده اند [۷۳] و [۷۴]. ماتریس های وزنی به صورت بلوکی قطری زیر فرض شده است:

$$Q = \begin{bmatrix} \gamma_1^2 I_{P \times P} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \gamma_2^2 I_{P \times P} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \gamma_R^2 I_{P \times P} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$R = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 I_{M \times M} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda_2^2 I_{M \times M} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \lambda_S^2 I_{M \times M} \end{bmatrix}$$

که در آن R و S تعداد خروجی ها و ورودی های سیستم است. فرض شده است که تک تک توابع تبدیل سیستم چندمتغیره به صورت مدل مرتبه اول با تأخیر زیر باشند:

$$\frac{Y_r(s)}{U_s(s)} = \frac{k_{rs} e^{-\theta_{rs}s}}{\tau_{rs}s + 1} \quad r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S \quad (33)$$

در این مقاله ها پارامترهای تنظیم به صورت زیر پیشنهاد شده اند:

اصلاح بعضی از ایرادات فرمول (۲۳) پرداخته شده است و فرمولی به صورت زیر ارائه شده است:

$$\lambda = k^2 \left(1.793 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \Gamma^{0.41} \Psi^{1.688} + 0.264 \right) \quad (24)$$

که در آن Ψ پارامتر جدیدی است که به سرعت پاسخ سیستم مرتبط است. برای سیستم با تأخیر کم در برابر ثابت زمانی، $\lambda = 0.264k^2$ را خواهیم داشت که نمی تواند پاسخ سریعی ایجاد نماید. در [۶۹] و [۷۰] از تحلیل واریانس برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین تعمیم یافته استفاده شده است. در این مراجع، سیستم مرتبه دوم با تأخیر^۱ به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$G_{m1}(s) = \frac{ke^{-tas}}{(s+p_1)(s+p_2)} \quad (25)$$

$$G_{m2}(s) = \frac{ke^{-tas}}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

با استفاده از تحلیل واریانس و برازش غیرخطی فرمول های تنظیم پارامتر وزنی به صورت زیر بدست آمده است:

$$\lambda = \omega_n^{-0.0342} (\xi + \omega_n)^{-0.046} + 1.136 (\omega_n)^{0.24} \Gamma^{-0.0021} \quad (26)$$

$$\lambda = \frac{(p_1 p_2)^{-0.064}}{(p_1 + p_2)^{0.8}} + 2.0374 (p_1 p_2)^{2.051} \Gamma^{-0.0746}$$

در فرمول ها تأخیر دیده نمی شود. علاوه بر این، نرمالیزه کردن ضریب وزنی نسبت به بهره ماندگار به صورت صریح در فرمول ها ظاهر نشده است. کاری مشابه در [۶۴] و [۶۷] انجام شده است و ایرادهای کارهای قبلی مرتفع گردیده است. در این مراجع با استفاده از مدل مرتبه اول با تأخیر برای تمام پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده ماتریس دینامیکی فرمول ارائه شده است. زمان نمونه برداری و افق پیش بین به مانند [۱۹] و افق مدل دو برابر مقدار پیشنهادی [۱۹] و برای افق کنترلی مقدار ۴ پیشنهاد شده است. برای تنظیم تابع معیاری به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$J = \int_0^{t_f} \left[(r(t) - y(t))^2 + \Gamma (\Delta u(t))^2 \right] dt \quad (27)$$

که در آن $r(t)$ سیگنال مرجع و t_f زمان کل شبیه سازی است. ابتدا λ نسبت به بهره سیستم نرمالیزه شده است، یعنی $\lambda = fk^2$ و سپس برای ارائه فرمول تنظیم f روندی مشابه با [۶۶] در پیش گرفته شده و با انتخاب مناسب بازه برای پارامترها فرمول زیر پیشنهاد شده است:

$$\lambda = k^2 \left(0.84 \left(\frac{\theta}{\tau} + 0.94 \right)^{0.15} \Gamma^{0.9} \right) \quad (28)$$

در کاری جدید با استفاده از تحلیل واریانس فرمول هایی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین چندمتغیره ارائه شده است [۷۱]. روند کار در

^۱- Second Order plus Dead Time (SOPDT)

روند تنظیم پارامترهای وزنی مشابه مقالات قبلی بوده ولی عدد شرطی ۱۰ در نظر گرفته شده است. فرمول زیر برای تنظیم پارامتر وزنی ارائه شده است:

$$\lambda = f(kT_s)^2$$

$$f = \frac{M^2(P-b+1)^3}{30M} - \frac{0.008M^3(P-b+1)^2}{10M} \quad (40)$$

در بخش پایانی مقاله با الهام از [۳۳] به بحث چندمتغیره هم پرداخته شده است. فرض شده که تک تک توابع تبدیل سیستم چندمتغیره $S \times R$ یا مرتبه اول با تأخیر پایدار و یا مرتبه اول انتگرالی هستند، یعنی:

$$\frac{Y_r(s)}{U_s(s)} = \frac{k_{rs}e^{-\theta_{rs}s}}{\tau_{rs}s + 1} \quad \text{or}$$

$$\frac{Y_r(s)}{U_s(s)} = \frac{k_{rs}e^{-\theta_{rs}s}}{s} \quad r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S \quad (41)$$

در این حالت، پارامترهای تنظیم به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$T_s = \min_{r,s}(T_{rs})$$

for $r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S$

$$T_{rs} = \begin{cases} \max(0.1\tau_{rs}, 0.5\theta_{rs}) & \text{non-integrating} \\ 0.5\theta_{rs} & \text{integrating} \end{cases}$$

$$\tau_{clrs} = \theta_{rs}\sqrt{10}$$

$$P = N = \max_{r,s}(X_{rs}) \quad r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S$$

$$X_{rs} = \begin{cases} \text{int}\left(\frac{5\tau_{rs}}{T_s}\right) + b_{rs} & \text{stable} \\ \text{int}\left(\frac{5\tau_{clrs}}{T_s}\right) + b_{rs} & \text{integrating} \end{cases}$$

$$b_{rs} = \text{int}\left(\frac{\theta_{rs}}{T_s}\right) + 1, \quad M = \max_{r,s}(Y_{rs}) \quad (42)$$

$$Y_{rs} = \begin{cases} \text{int}\left(\frac{\tau_{rs}}{T_s}\right) + b_{rs} & \text{stable} \\ \text{int}\left(\frac{\tau_{clrs}}{T_s}\right) + b_{rs} & \text{integrating} \end{cases}$$

$$\lambda_s^2 = \frac{M}{10} \sum_{r=1}^R \gamma_j^2 k_{rs}^2 \left\{ P - b_{rs} - \frac{3\tau_{rs}}{2T_s} + 2 - \frac{M-1}{2} \right\}$$

$$+ \frac{1}{10M} \sum_{r=1}^R \gamma_j^2 k_{rs}^2 T_s^2 \left([M^2(P-b_{rs}+1)^3/3] - 0.008M^3(P-b_{rs}+2)^2 \right) \quad s = 1, \dots, S$$

در [۷۶] بحث تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین در فضای حالت برای دستیابی به عملکرد مقاوم مطرح گردیده است. با در نظر گرفتن نویز و تخمین‌زن حالت به تنظیم کنترل پیش‌بین برای سیستم‌های چندمتغیره پرداخته شده است و قواعدی برای پارامترهای قابل تنظیم بیان شده است. به عنوان مثال برای ماتریس وزنی و با نرمالیزه‌سازی ورودی‌ها فرمول زیر ارائه شده است:

$$\mathbf{R} = \lambda \begin{bmatrix} 1 & & & \mathbf{0} \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \lambda_M \end{bmatrix} \mathbf{R}_I^T \quad (43)$$

که \mathbf{R}_I ماتریس نامعینی ورودی و λ_2 تا λ_M با توجه به حداکثر خطا در هر خروجی در اثر نامعینی در ورودی انتخاب می‌شوند. به این ترتیب فقط

$$T_s = \min_{r,s}(T_{rs})$$

for $r = 1, \dots, R, \quad s = 1, \dots, S$

$$T_{rs} = \max\left(\frac{\tau_{rs}}{10}, \frac{\theta_{rs}}{2}\right)$$

$$P = N = \max_{r,s}\left(\text{int}\left(\frac{5\tau_{rs}}{T_s}\right) + b_{rs}\right) \quad (34)$$

$$M = \max_{r,s}\left(\text{int}\left(\frac{\tau_{rs}}{T_s}\right) + b_{rs}\right)$$

$$b_{rs} = \text{int}\left(\frac{\theta_{rs}}{T_s}\right) + 1$$

برای انتخاب γ_j^2 فرمولی ارائه نشده و فقط به این راهکار بسنده شده است که این ضرایب برای هر خروجی اندازه‌گیری شده طوری انتخاب شوند که دامنه خروجی‌ها در یک بازه قرار گیرند. برای λ_s^2 ها روند مشابه به حالت تک ورودی-تک خروجی [۱۹] در پیش گرفته شده است و در نهایت با در نظر گرفتن عدد شرطی ۵۰۰ برای تنظیم ضرایب ماتریس وزنی تغییرات سیگنال‌های کنترلی چنین فرمولی ارائه کرده‌اند:

$$\lambda_s^2 = \frac{M}{500} \sum_{r=1}^R \gamma_r^2 k_{rs}^2 \left\{ P - b_{rs} - \frac{3\tau_{rs}}{2T_s} + 2 - \frac{M-1}{2} \right\} \quad s = 1, \dots, S \quad (35)$$

مقاله [۷۵] با هدف ارائه فرمول تنظیم برای کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی چندمتغیره با یک یا چند زیر توابع تبدیل دارای انتگرال‌گیر ارائه شده است. در این مرجع ابتدا به معرفی روش کنترل‌کننده ماتریس دینامیکی اصلاح شده که برای سیستم‌های انتگرالی است، پرداخته شده است. در ادامه برای حالت تک ورودی-تک خروجی فرمول‌هایی ارائه شده است و سپس به حالت چندمتغیره تعمیم داده شده است. در حالت تک ورودی-تک خروجی برای تقریب سیستم واقعی مدل مرتبه اول با تأخیر انتگرالی زیر فرض شده است:

$$G_m(s) = \frac{ke^{-\theta s}}{s} \quad (36)$$

زمان نمونه‌برداری در این مقاله به صورت زیر پیشنهاد داده شده است:

$$T_s \leq 0.5\theta \quad (37)$$

در سیستم‌های انتگرالی از پاسخ پله حلقه باز نمی‌توان استفاده کرد. برای سیستم حلقه بسته مقدار مطلوب زمان نشست به صورت زیر در نظر گرفته شده است تا از آن بتوان برای محاسبه افق‌ها استفاده نمود:

$$\tau_{cl} = \theta\sqrt{10} \quad (38)$$

افق‌های پیش‌بینی، مدل و کنترل در این مقاله به این صورت انتخاب می‌شوند:

$$P = N = \text{int}\left(\frac{5\tau_{cl}}{T_s}\right) + b, \quad M = \text{int}\left(\frac{\tau_{cl}}{T_s}\right) + b \quad (39)$$

$$b = \text{int}\left(\frac{\theta}{T_s}\right) + 1$$

$$G_{cl}(z) = \frac{y_p(n)}{w(n)} = \frac{\hat{K}_{y1}}{\Delta_{cl}(z)}$$

$$\Delta_{cl}(z) = z^d [z^2 + z(-1 - a + \hat{K}_{x1} + \hat{K}_{y1}) + (a - \hat{K}_{x1})] \quad (46)$$

که در آن \hat{K}_{x1} و \hat{K}_{y1} بهره هایی هستند که از پارامترهای مدل و پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده ناشی می شوند. در ادامه مفهوم بهره های شدنی^۲ معرفی می شود. این مفهوم کلیدی نقش تعیین کننده ای در بررسی عملکرد سیستم حلقه بسته دارد و عملکردهای امکان پذیر سیستم حلقه بسته را به ازای پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده تعیین می کند. در این مقاله تاکید شده است که بهره های مطلوب \hat{K}_{xd1} و \hat{K}_{yd1} توسط کاربر انتخاب می شوند. در صورتی که پارامترهای تنظیمی وجود داشته باشند که به این بهره ها منجر شود به بهره های انتخاب شده بهره های مطلوب شدنی گفته می شود. در ادامه برای رسیدن به بهره های مطلوب شدنی، با در نظر گرفتن افق کنترل یک و دو قضایایی مطرح شده است. فرمول های تنظیم ارائه شده برای سیستم پایدار معتبر بوده و همچنین محدودی بهره های شدنی نیز در این قضا یا مشخص می گردد. نشان داده می شود که تمام عملکرد شدنی با افق کنترل یک و یا دو قابل حصول بوده و نیازی به افزایش حجم محاسبات به واسطه بالا بردن افق کنترل نیست. این نتیجه مهمی است که در کنار کاهش حجم محاسباتی، ساختار کنترل کننده را نیز ساده تر و تنظیم و تحلیل آن را ساده تر می سازد. در این جا یکی از قضایای تنظیم که برای افق کنترل دو ارائه شده است، بیان می شود. گفته شده است که برای افق کنترل دو با انتخاب وزن های ضریب تغییرات سیگنال کنترلی به عنوان پارامترهای تنظیم، بهره های مطلوب شدنی \hat{K}_{xd1} و \hat{K}_{yd1} ناتسای های زیر را بر آورده می سازند:

$$\hat{K}_{yd1} > 0, \quad 0 < \hat{K}_{xd1} < a, \quad \frac{1}{a} \frac{Y_{11}}{X_{11}} < \frac{\hat{K}_{yd1}}{\hat{K}_{xd1}} < \frac{1}{a} \quad (47)$$

و فرمول های تنظیم برای رسیدن به بهره های مطلوب شدنی عبارت اند از:

$$r_1 = \frac{(Y_{11}X_{12} - X_{11}Y_{22})(a - \hat{K}_{xd1})}{aX_{12}\hat{K}_{yd1} - Y_{22}\hat{K}_{xd1}} \quad (48)$$

$$r_2 = \frac{(Y_{11}X_{22} - X_{12}Y_{22})(\hat{K}_{xd1} - a\hat{K}_{yd1})}{aX_{11}\hat{K}_{yd1} - Y_{11}\hat{K}_{xd1}} \quad (49)$$

که در آن:

$$X_{11} = 1 + q_2(1+a)^2 + q_3(1+a+a^2)^2 + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-1})^2$$

$$X_{12} = q_2(1+a) + q_3(1+a)(1+a+a^2) + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-2})(1+\dots+a^{p-1})$$

$$X_{22} = q_2 + q_3(1+a)^2 + q_4(1+a+a^2)^2 + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-2})^2$$

$$Y_{11} = 1 + q_2(1+a) + q_3(1+a+a^2) + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-1})$$

$$Y_{22} = q_2 + q_3(1+a) + q_4(1+a+a^2) + \dots + q_p(1+\dots+a^{p-2}) \quad (49)$$

λ پارامتر تنظیم باقی می ماند که در مقاله گفته شده این پارامتر را کم کم افزایش می دهیم تا به عملکرد مقاوم مطلوب دست یابیم.

برای سیستم های چندمتغیره غیرمی نیم فاز روش تنظیمی به قصد عملکرد مقاوم سیستم حلقه بسته ارائه شده است [۷۷] که مبتنی بر عدد عملکرد مقاوم^۱ است. در این مقاله زمان نمونه برداری به صورت $0.06T_s \leq T_r \leq 0.4T_s$ انتخاب می شود. که در آن T_r زمان خیز پاسخ پله برای سیستم حلقه بسته مطلوب است. برای حد بالای افق پیش بینی، زمان نشست سیستم حلقه باز و برای حد پایین آن هم میزان تأخیر پیشنهاد شده است. افق کنترل یک چهارم حد بالای افق پیش بینی انتخاب می شود. ماتریس های وزنی به صورت قطری هستند و برای دستیابی به عملکرد مطلوب و هم رنج سازی سیگنال های سیستم به کار می روند. یک الگوریتم کامل برای تنظیم ماتریس های وزنی با استفاده از جهت های صفر ورودی و خروجی و عدد عملکرد مقاوم ارائه شده است.

در [۷۸] به بررسی تحلیلی تأثیر پارامترهای قابل تنظیم کنترل پیش بین بر عملکرد سیستم حلقه بسته از دیدگاه مقادیر ویژه آن پرداخته شده است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار MATHEMATICA روابطی تحلیلی برای ارتباط پارامترها با قطب های حلقه بسته به دست آمده است. با توجه به پیچیدگی فراوان روابط، تأثیر هر پارامتر با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها (اغلب صفر یا یک) انجام شده است. در این مقالات بر روی افق پیش بینی تاکید فراوانی شده است و نقش ضریب وزنی مورد توجه قرار نگرفته است.

در [۱۸] با در نظر گرفتن مدل مرتبه اول با تأخیر برای سیستم، روش تحلیلی برای تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین تک ورودی- تک خروجی ارائه شده است. مدل مرتبه اول بدون تأخیر (۱۸) با فرض زمان نمونه برداری T_s به صورت زیر گسسته سازی می شود:

$$G_m(z^{-1}) = \frac{y_m(n)}{u(n)} = \frac{k(1-a)z^{-d-1}}{1-az^{-1}} \quad (44)$$

که در آن $a = e^{-\frac{T_s}{\tau}}$ و $d = \theta/T_s$ و $y_m(n)$ و $u(n)$ به ترتیب خروجی مدل و سیگنال کنترل در لحظه n هستند و تأخیر ضریب صحیحی از زمان نمونه برداری فرض شده است. در این مقاله از نمایش فضای حالت تابع تبدیل داده شده استفاده شده و پیش بینی خروجی ها به دست آمده است. تابع معیار در نظر گرفته شده عبارت است از:

$$\min_{\Delta u(n)} \left(\mathbf{w}(n) - \mathbf{y}_p(n) \right)^T \mathbf{Q} \left(\mathbf{w}(n) - \mathbf{y}_p(n) \right) + \left(\Delta \mathbf{u}(n) \right)^T \mathbf{R} \left(\Delta \mathbf{u}(n) \right)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & q_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & q_p \\ \mathbf{0} & & & & \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = k^2(1-a)^2 \begin{bmatrix} r_1 & & & \mathbf{0} \\ & r_2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & r_M \end{bmatrix} \quad (45)$$

در حالی که بین خروجی سیستم و مدل تفاوتی نباشد، تابع تبدیل سیستم حلقه بسته به صورت زیر محاسبه شده است:

²- Feasible

¹- Robust performance number

$$pH = -\log_{10}[H^+] \quad (52)$$

کنترل این فرآیند غیرخطی با کنترل کننده ثابت مناسب نبوده، عملکرد مطلوبی ندارد و نیازمند روش‌های دیگری می‌باشد [۸۱]. اما برای بازه کوچکی از تغییرات pH می‌توان از تک کنترل کننده استفاده کرد. در این مثال، بازه ۵/۷۵ تا ۷ برای pH در نظر گرفته می‌شود. در این بازه، می‌توان فرآیند را با مدل زیر توصیف کرد:

$$G_m(s) = \frac{0.4e^{-30s}}{95s + 1} \quad (53)$$

برای این مدل، زمان نمونه برداری $T_s = 10 \text{ sec}$ مناسب است. در این فرآیند اندازه گیری pH در داخل مخزن انجام نشده و با فاصله‌ای از مخزن اندازه گیری انجام می‌شود. این فاصله، تاخیری در خروجی ایجاد می‌کند که ۳۰ ثانیه فرض شده است.

روش تنظیم ارائه شده در [۱۸] با بهره‌های مطلوب $K_{x,d1} = 0.4$ و $K_{y,d1} = 0.07$ برای مدل (۵۳) به پاسخ حلقه بسته با زمان نشست حدود ۲۵۰ ثانیه و بدون فرجهش می‌انجامد. برای دستیابی به این بهره‌ها، از قضایای آمده در [۱۸] استفاده می‌کنیم. داریم:

$$P = 10, M = 1, R = \lambda = 3822.5 \quad (54)$$

$$Q = \text{diag}\{1, 1, \dots, 1, 69.32\}$$

روش تنظیم ارائه شده در [۱۹] برای کنترل ماتریس دینامیکی منجر به پارامترهای تنظیم زیر می‌شود:

$$P = N = 48, M = 4, \lambda = 0.043 \quad (55)$$

در [۶۴] و [۶۷] پارامترهای تنظیم به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$P = 40, N = 80, M = 4, \Gamma = 1, \lambda = 0.139 \quad (56)$$

با مرجع [۶۲] نیز پارامترهای تنظیم همانند (۵۵) انتخاب می‌شود، به جز ضریب وزنی که با توجه به بهره حالت ماندگار سیستم به صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$\lambda = 1.6 \quad (57)$$

در شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی روش‌های مذکور برای فرآیند pH آمده است. نتایج ردیابی ورودی پله به همراه حذف اغتشاش در این شکل آمده است. در لحظه ۴۵۰۰ ثانیه اغتشاش بافر وارد شده است. هم‌چنین برای بررسی مقاومت روش‌ها در برابر نامعینی، بعد از ورود اغتشاش پله بافر، ورودی مرجع به مقدار ۷ تغییر داده شده است. با توجه به این‌که با تغییر بافر رفتار دینامیکی فرآیند تغییر می‌کند، عملکرد کنترل کننده در ردیابی این مقدار می‌تواند نشان‌گر میزان مقاومت کنترل کننده در برابر نامعینی در مدل باشد.

در این مثال روش تنظیم ارائه شده در [۶۲]، پاسخ کندی در ردیابی و حذف اغتشاش دارد. اما در برابر نامعینی مقاومت خوبی نشان داده است. روش [۱۹] به پاسخ سریعی در ردیابی و حذف اغتشاش منجر شده است. این سرعت زیاد مقاومت را در برابر نامعینی پایین می‌آورد و حتی

در [۷۹] روش مطرح شده در [۱۸] به سیستم‌های ناپایدار و دارای تاخیر غیرضریب صحیح از زمان نمونه برداری تعمیم داده شده است.

۶- مطالعه مقایسه‌ای عملکرد چند روش تنظیم با شبیه‌سازی

در این بخش به مقایسه چند روش تنظیمی که فرمول‌های بسته ارائه کرده‌اند پرداخته می‌شود. این مقایسه با شبیه‌سازی بر روی فرآیند تک ورودی-تک خروجی pH انجام می‌شود. در این مثال عملکرد ردیابی، حذف اغتشاش و مقاومت فرمول‌های تنظیم در برابر نامعینی مورد مطالعه قرار گرفته است. روش‌های مد نظر از مراجع [۱۸]، [۱۹]، [۶۲]، [۶۴] و [۶۷] انتخاب شده‌اند.

مسئله رگوله‌سازی و کنترل فرآیند pH یک مسئله کنترل غیرخطی دشوار است که در صنعت به وفور یافت می‌شود از جمله می‌توان به فرآیندهای شیمیایی همچون خنثی سازی پساب^۱، تخمیر، تولید صابون‌ها یا اسیدهای چرب اشاره کرد. مدل‌سازی کاملی از یک فرآیند چندمتغیره pH در [۸۰] ارائه شده است. این فرآیند سه ورودی و دو خروجی دارد. ورودی‌های این فرآیند اسید، باز و بافر^۲ و خروجی‌های آن pH خروجی از مخزن ترکیب و ارتفاع محلول داخل مخزن است. دبی ورودی اسید با F_a ، باز با F_b و دبی بافر با F_{bf} نشان داده شده است. در حالت تک ورودی-تک خروجی یکی از ورودی‌های اسید یا باز ثابت فرض می‌شود و pH تنها خروجی فرآیند است. هم‌چنین فرض می‌شود بافر اغتشاش غیر قابل اندازه گیری این فرآیند است. روابط دینامیکی حاکم بر فرآیند pH که در [۸۰] معرفی شده است، به صورت زیر است:

$$\frac{dw_a}{dt} = \frac{1}{V} [(w_{aa} - w_a)F_a + (w_{ba} - w_a)F_b + (w_{bfa} - w_a)F_{bf}] \quad (50)$$

$$\frac{dw_b}{dt} = \frac{1}{V} [(w_{ab} - w_b)F_a + (w_{bb} - w_b)F_b + (w_{bfb} - w_b)F_{bf}]$$

که در آن V حجم محلول موجود در مخزن، w_a و w_b متغیرهای تغییرناپذیر و اکنش^۳ و w_{ij} ثابت‌هایی هستند که مقادیر آن‌ها در [۸۰] آمده است. معادله استاتیکی حاکم بر این فرآیند که در تعیین pH نقش دارد به رابطه تراسیون^۴ معروف است و غلظت یون هیدرونیوم $[H^+]$ را می‌دهد به صورت زیر می‌باشد:

$$[H^+]^4 + [H^+]^3(k_{a1} - w_a) + [H^+]^2 \times (k_{a1}(k_{a2} - w_a - w_b) - k_w) + [H^+] \times (k_{a1}(k_w + k_{a2}(w_a + 2w_b))) - k_{a1}k_{a2}k_w = 0 \quad (51)$$

ثابت‌های معادله فوق در [۸۰] آمده است. معادله فوق چهار جواب دارد که فقط یکی از آن‌ها معتبر است. این جواب از طریق رابطه زیر، pH را تعیین می‌کند:

¹ Waste Water Neutralization

² Buffer

³ Reaction invariants

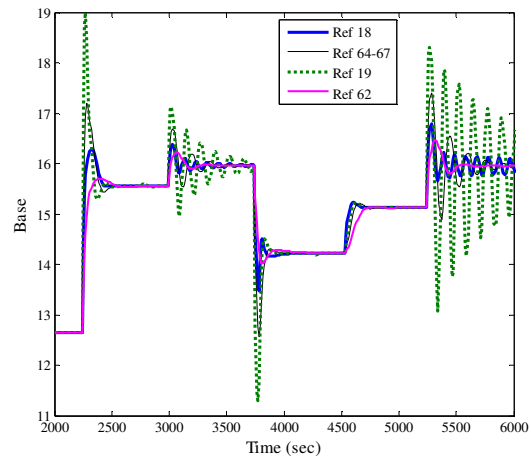
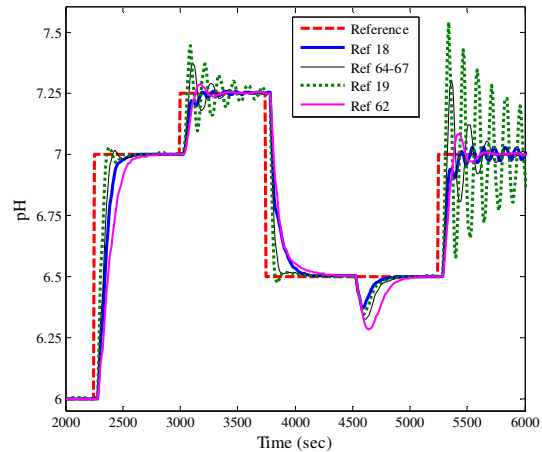
⁴ Titration

هر روش کنترلی بسیار پر اهمیت است و شرط دستیابی به عملکرد مطلوب، تنظیم صحیح پارامترهای کنترل کننده است. از همان سال های نخست که روش های کنترل پیش بین ارائه شد، تعداد زیادی از محققان به مسأله تنظیم پارامترهای این کنترل کننده ها پرداخته اند. در این مقاله پس از بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار سیستم حلقه بسته با کنترل پیش بین و ارائه یک دسته بندی، روش های مختلف تنظیم کنترل کننده های پیش بین به اختصار مرور شدند. در بین روش های تنظیم، روش هایی که بر پایه های نظری به فرمول های بسته منجر شده اند بیشتر مورد توجه قرار گرفت. در این گزارش علاوه بر مطالعه روش های مختلف تنظیم، با یک مثال بعضی از روش های تنظیم را که فرمول های بسته ارائه کرده اند، مقایسه نموده و نقاط قوت و ضعف هر کدام نشان داده شد.

مراجع

- [1] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud, J. Papon, "Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes", *Automatica*, vol. 14, no. 5, pp. 413-428, 1978.
- [2] C.E. Garcia, D.M. Prett, M. Morari, "Model predictive control: theory and practice-a survey", *Automatica*, vol. 25, no. 3, pp. 335-348, 1989.
- [3] M. Morari, J. H Lee, "Model predictive control: past, present and future," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 667-682, 1999.
- [4] J. A. Rossiter, *Model-based predictive control: a practical approach*. CRC press, 2003.
- [5] S. J. Qin, T. A. Badgwell, "A survey of industrial model predictive control technology", *Control Engineering Practice*, vol. 11, no. 7, pp. 733-764, 2003.
- [6] E. F. Camacho, C. Bordons, *Model Predictive Control*, 2th ed, London, Springer-Verlog, 2004.
- [7] J. B. Rawlings, D. Q. Mayne, *Model Predictive Control: Theory and Design*, London, U.K.: Nob Hill Publishing, 2009.
- [8] M. Kano, M. Ogawa, "The state of the art in chemical process control in Japan: Good practice and questionnaire survey", *Journal of Process Control*, vol. 20, no. 9, pp. 969-982, 2010.
- [9] J. Mattingley, Y. Wang, S. Boyd, "Receding horizon control", *Control Systems, IEEE*, vol. 31, no. 3, pp. 52-65, 2011.
- [10] J. H. Lee, "Model predictive control: Review of the three decades of development", *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 415-424, 2011.
- [11] M. L. Darby, M. Nikolaou, "MPC: Current practice and challenges", *Control Engineering Practice*, vol. 20, no. 4, pp. 328-342, 2012.

می تواند به ناپایداری بیانجامد. روش ارائه شده در [۶۴] و [۶۷] در ردیابی سرعت نسبتاً بالایی دارد و در حذف اغتشاش عملکرد متوسطی دارد. نهایتاً روش ارائه شده در [۱۸] سرعت متوسطی در ردیابی داشته و حذف اغتشاش با سرعت بالایی انجام می پذیرد. در برابر نامعینی نیز مقاومت خوبی از خود نشان داده است.



شکل ۱: پاسخ حلقه بسته فرآیند pH برای روش های مختلف تنظیم.

در جدول ۱ خطا و انرژی سیگنال کنترلی آمده است. کم ترین خطا در کل مربوط به روش [۶۴] و [۶۷] و سپس [۱۸] است و بیش ترین خطا را روش [۶۲] دارد.

روش تنظیم	مرجع [۱۸]	مرجع [۱۹]	مرجع [۶۲]	مرجع [۶۴]
	13.64	13.84	17.35	12.51
	92840	93015	92441	92880

۵- نتیجه گیری

ویژگی های منحصر به فرد کنترل کننده های پیش بین، این خانواده از کنترل کننده ها را روز به روز بیشتر مورد توجه دانشگاهیان و صنعتگران قرار داده است. از طرف دیگر، مسأله تنظیم پارامترهای کنترل کننده برای

- [25] C. M. Reverter, J. Ibarrola, J. M. Cano-Izquierdo, "Tuning rules for a quick start up in Dynamic Matrix Control", *ISA Transactions*, vol. 53, no. 2, pp. 612-627, 2014.
- [26] P. Boucher, D. Dumur, S. Daumuller, "Automatic Design of Tuning Parameters for Predictive Control of CNC Machines", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 417-420, 1992.
- [27] A. Jiang, A. Jutan, "Response surface tuning methods in Dynamic Matrix Control of a pressure tank system", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 39, no. 10, pp. 3835-3843, 2000.
- [28] J. A. D. Rodrigues, E. C. V. Toledo, R. M. Filho, "A tuned approach of the predictive-adaptive GPC controller applied to a fed-batch bioreactor using complete factorial design", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 26, no. 10, pp. 1493-1500, 2002.
- [29] A. Altınten, "Generalized predictive control applied to a pH neutralization process", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 31, No. 10, 2007, pp. 1199-1204.
- [30] N. Hoffmann, S. Thomsen, F.W. Fuchs, "Appropriate tuning and robust design of a generalized predictive speed controller for drive systems with resonant loads", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Atlanta, GA, pp. 764-771, 2010.
- [31] J. M. Grosso, C. Ocampo-Martínez, V. Puig, "Learning-based tuning of supervisory model predictive control for drinking water networks", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 7, pp. 1741-1750, 2013.
- [32] T. J. Vyncke, S. Thielemans, J. A. A. Melkebeek, "Simulation-based weight factor selection and FPGA prediction core implementation for finite-set model based predictive control of power electronics", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 91, pp. 150-166, 2013.
- [33] R. K. Mishra, R. Khalkho, B. Kumar, T. K. Dan, "Effect of tuning parameters of a model predictive binary distillation column", In *IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICE-CCN)*, pp. 660-665, 2013.
- [34] S. K. Ahmed, D. J. Chmielewski, "On the Tuning of Predictive Controllers for Hybrid Fuel Cell Vehicle Applications, In the 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, Mumbai, India, pp. 129-134, 2013.
- [35] Y. P. Gupta, "Characteristic Equations and Robust Stability of a Simplified Predictive Control Algorithm", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 71, no. 4, pp. 617-624, 1993.
- [12] D. Hrovat, S. Di Cairano, H. E. Tseng, I. V. Kolmanovsky, "The development of model predictive control in automotive industry: A survey", In *Proc. of IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, Dubrovnik, Croatia, pp. 295-302, Oct 2012.
- [13] K. Y. Rani, H. Unbehauen, "Study of Predictive Controller Tuning Methods", *Automatica*, vol. 33, no. 12, pp. 2243-2248, 1997.
- [14] L. Garriga, M. Soroush, "Model Predictive Control Tuning Methods: A Review", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 8, pp. 3505-3515, 2010.
- [15] R. D. Kokate, L. M. Waghmare, S. D. Deshmukh, "Review of Tuning Methods of DMC and Performance Evaluation with PID Algorithms on a FOPDT Model", In *Proc. of International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom)*, pp. 71-75, 2010.
- [16] C. R. Cutler, B. L. Ramaker, "Dynamic Matrix Control: A Computer Control Algorithm", *Proceeding of joint Automatic Control Conference*, 1980.
- [17] D. W. Clarke, C. Mohtadi, P. S. Tuffs, "Generalized predictive control-Part I. The basic algorithm", *Automatica*, vol. 23, no. 2, pp. 137-148, 1987.
- [18] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, "Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models", *IET Control Theory & Applications*, vol. 7, no. 14, pp. 1806-1817, 2013.
- [19] R. Shridhar, D. J. Cooper, "A tuning strategy for unconstrained SISO model predictive control", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 36, no. 3, pp. 729-746, 1997.
- [20] K. P. Lam, "Implicit and explicit self-tuning controllers", *OUEL Report*, No. 1334/80, University of Oxford, 1980.
- [21] C. R. Cutler, "Dynamic Matrix Control, an optimal multivariable control algorithm with constraints", *Ph.D. Dissertation*, University of Houston, Houston, TX, 1983.
- [22] C. E. Garcia, M. Morari, "Internal model control. A unifying review and some new results", *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 21, no. 2, pp. 308-323, 1982.
- [23] A. R. McIntosh, S. L. Shah, D. G. Fisher, "Analysis and tuning of adaptive generalized predictive control", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 69, no. 1, pp. 97-110, 1991.
- [24] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, New York, 2nd ed, 2004.

- [48] G. Z. Gous, P. L. de Vaal, "Using MV overshoot as a tuning metric in choosing DMC move suppression values", *ISA Transactions*, vol. 51, pp. 657-664, 2012.
- [49] M. Vallerio, J. Van Impe, F. Logist, "Tuning of NMPC controllers via multi-objective optimization", *Computers & Chemical Engineering*, vol. 61, pp. 38-50, 2014.
- [50] A. Al. Ghazzawi, E. Ali, A. Nouh and E. Zafiriou, "On-line Tuning Strategy for Model Predictive Controllers", *Journal Process Control*, vol. 11, pp. 265-284, 2001.
- [51] E. Ali, "Heuristic On-line Tuning for Nonlinear Model Predictive Controllers using Fuzzy Logic", *Journal of Process Control*, vol. 13, pp. 383-396, 2003.
- [52] K. Han, J. Zhao, J. Qian, "A Novel Robust Tuning Strategy for Model Predictive Control", In the Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, pp. 6406-6410, 2006.
- [53] G. A. Bunin, F. Fraire, G. François, D. Bonvin, "Run-to-run MPC tuning via gradient descent", In 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering, London, pp. 927-931, 2012.
- [54] J. M. Maciejowski, "Reverse engineering existing controllers for MPC design", In 3rd IFAC Symposium on Power System, Structure and Control, Iguassu Falls, Brazil, pp. 436-441, 2007.
- [55] E. N. Hartley, J. M. Maciejowski, "Initial tuning of predictive controllers by reverse engineering", In Proc. 10th European Control Conf., Budapest, Hungary, pp. 725-730, 2009.
- [56] M. Foo, E. Weyer, "On reproducing existing controllers as model predictive controllers", In Australian Control Conference (AUCC), pp. 303-308, 2011.
- [57] E. N. Hartley, J. M. Maciejowski, "Designing Output-Feedback Predictive Controllers by Reverse-Engineering Existing LTI Controllers", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, no. 11, pp. 2934-2939, 2013.
- [58] S. Di Cairano, A. Bemporad, "Model Predictive Control Tuning by Controller Matching", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 55, no. 1, pp. 185-190, 2010.
- [59] G. Shah, S. Engell, "Tuning MPC for Desired Closed-Loop Performance for SISO Systems", In 18th Mediterranean Conference on Control & Automation, Marrakech, Morocco, pp. 628-633, 2010.
- [60] G. Shah, S. Engell, "Tuning MPC for Desired Closed-Loop Performance for MIMO Systems", In American Control Conference (ACC), San Francisco, USA, pp. 4404-4409, 2011.
- [61] G. Shah, S. Engell, "Multivariable MPC design based on a frequency response approximation
- [36] R. Dubay, G. Kember, B. Pramujatic, "Well-conditioned model predictive control", *ISA Transactions*, vol. 43, pp. 23-32, 2004.
- [37] M. Abu-Ayyad, R. Dubay, G. C. Kember, "SISO extended predictive control-implementation and robustness ability analysis", *ISA Transactions*, vol. 45, pp. 9-20, 2006.
- [38] A. R. Neshasteriz, A. Khaki Sedigh, H. Sadjadian, "Generalized predictive control and tuning of industrial processes with second order plus dead time models", *Journal of Process Control*, vol. 20, no. 1, pp. 63-72, 2010.
- [39] S. Drogies, D. De Geest, "Predictive Control: Propositions for the Design Methodology", American Control Conference (ACC), San Diego, California, pp. 647-651, 1999.
- [40] O. Jing, R. R. Rhinehart, "CV Damping versus MV Suppression for MPC Tuning", American Control Conference (ACC), OK, USA, pp. 2695-2700, 2002.
- [41] H. Cui, Z. Pang, Z. Pang, "Generalized Predictive Control Based on Input Design", 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, pp. 5594-5599, 2008.
- [42] M. Mahfouf, D. A. Linkens, M. F. Abbod, "Multi-objective genetic optimization of GPC and SOFLC tuning parameters using a fuzzy-based ranking method," *IEEE Proceedings-Control Theory and Applications*, vol. 147, no. 3, pp. 344-354, 2000.
- [43] S. Filaliy, V. Wertzz, "Using genetic algorithms to optimize the design parameters of generalized predictive controllers", *International Journal of Systems Science*, vol. 32, no. 4, pp. 503-512, 2001.
- [44] J. H. Van der Lee, W. Y. Svrcek, B. R. Young, "A tuning algorithm for model predictive controllers based on genetic algorithms and fuzzy decision making", *ISA Transactions*, vol. 47, pp. 53-59, 2008.
- [45] G. Hongge, K. Xie, "A Tuning Scheme for Parameters of Generalized Predictive Controller Based on Mind Evolutionary Algorithm", In International Conference on Computing, Measurement, Control and Sensor Network (CMCSN), pp. 307-310, 2012.
- [46] P. Vega, M. Francisco, F. Tadeo, "Multiobjective optimization for automatic tuning of robust Model Based Predictive Controllers", In 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, pp. 6980-6985, 2008.
- [47] G. A. Nery Júnior, M. A. F. Martins, R. Kalid, "A PSO-based optimal tuning strategy for constrained multivariable predictive controllers with model uncertainty", *ISA Transactions*, vol. 53, no. 2, pp. 560-567, 2014.

- [75] D. Dougherty, D. J. Cooper, "Tuning Guidelines of a Dynamic Matrix Controller for integrating (non-self regulating) processes", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 8, pp. 1739-1752, 2003.
- [76] J. H. Lee, Z. H. Yu, "Tuning of Model Predictive Controllers for Robust Performance", *Computers & Chemical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 15-37, 1994.
- [77] J.O. Trierweilera, L.A. Farinab, "RPN tuning strategy for model predictive control", *Journal of Process Control*, vol. 13, no. 7, pp. 591-598, 2003.
- [78] J. L. Garriga, M. Soroush, "On the effects of tunable parameters of model predictive control on the locations of closed-loop eigenvalues", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 17, pp.7951-7956, 2010.
- [79] P. Bagheri, A. Khaki-Sedigh, "Closed Form Tuning Equations for Model Predictive Control of First-Order", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, (vol 13, no 1, February 2015). DOI: 10.1007/s12555-014-0007-6.
- [80] M. A. Henson, D. E. Seborg, "Adaptive nonlinear control of a pH neutralization process", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 169-182, 1994.
- [81] P. Bagheri, V. Mardanlou, A. Fatehi, A, "Multiple Model Predictive Control of Multivariable pH Process Using Adaptive Weighting Matrices", In Proc of 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, pp. 12366-12371, 2011.
- approach", In *European Control Conference (ECC)*, pp. 13-18, 2013.
- [62] R. F. Hinde Jr, D. J. Cooper, "A pattern-based approach to excitation diagnostics for adaptive process control", *Chemical Engineering Science*, vol. 49, no. 9, pp. 1403-1415, 1994.
- [63] W. Wojsznis, J. Gudaz, T. Blevins, A. Mehta, "Practical approach to tuning MPC", *ISA Transactions*, vol. 42, pp. 149-162, 2003.
- [64] P. Bagheri, A. Khaki-Sedigh, "Tuning of Dynamic Matrix Controller for FOPDT models using analysis of variance", In Proc of 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, pp. 12319-12324, 2011.
- [65] M. Schwarz, C. S. Cox, J. Börcsök, "A Filtered Tuning Method for a GPC Controller", In *IET Irish Signals and Systems Conference*, Cork Ireland, 2010, pp.180-185.
- [66] E. J. Iglesias, M. E. Sanjuan, C. A. Smith, "Tuning equation for dynamic matrix control in SISO loops", *Revista Ingenieria y Desarrollo*, Vol. 19, 2006, pp. 88-100.
- [67] P. Bagheri, A. Khaki-Sedigh, "An ANOVA based analytical Dynamic Matrix Controller tuning procedure for FOPDT models", *Amirkabir Journal of Modeling, Identification, Simulation and Control*, vol. 42, no. 2, pp. 55-64, Fall 2010.
- [۶۸] محمد قاضی مغربی، تنظیم پارامترهای ماتریس دینامیکی DMC، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، شهریور ۱۳۸۸.
- [۶۹] امیررضا نشاسته‌ریز، تنظیم خودکار کنترل‌کننده‌های پیش‌بین تعمیم یافته (GPC)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، مرداد ۱۳۸۸.
- [70] A. R. Neshasteriz, A. Khaki-Sedigh, H. Sadjadian, "An Analysis of Variance Approach to Tuning of Generalized Predictive Controllers for Second Order plus Dead Time Models", In Proc of 8th IEEE International Conference on Control & Automation, pp 180-186, 2009.
- [۷۱] زاهد ابراهیمی، تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین چندمتغیره بر اساس ANOVA، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، بهمن ۱۳۹۲.
- [72] R. Shridhar, D. J. Cooper, "Selection of the move suppression coefficients in tuning Dynamic Matrix Control", In *American Control Conference*, New Mexico, pp. 729-733, 1997.
- [73] R. Shridhar, D. J. Cooper, "A novel tuning strategy for multivariable predictive control," *ISA Transactions*, vol. 36, no. 4, pp. 273-280, 1998.
- [74] R. Shridhar, D. J. Cooper, "A tuning strategy for unconstrained multivariable model predictive control", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 37, pp. 4003-4016, 1998.