

## روشی نوین جهت افزایش مقاومت پیش بین کننده اسمیت در مقابل خطای مدل

منصوره اسماعیلی<sup>۱</sup>، منصور شیروانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا مهندسی شیمی، گروه کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، [m.esmaeli@nipc.net](mailto:m.esmaeli@nipc.net)

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، [shirvani.m@iust.ac.ir](mailto:shirvani.m@iust.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۸/۹/۲۳، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۸۸/۱۲/۴)

**چکیده:** در این مقاله روشی جدید برای افزایش مقاومت روش جبرانگر تاخیر زمانی اسمیت در مقابل خطای مدل ارائه شده است. این روش بر اساس مفهوم بهره برتر می باشد. در این روش با دانستن حداکثر خطا و استفاده از مفهوم بهره برتر، تابع حلقه باز سیستم کنترل با اضافه کردن تابع مناسبی طوری تنظیم میکنیم که مطمئن باشیم تمامی صفرهای معادله حلقه باز سیستم کنترل که ناشی از پارامتر تاخیر زمان می باشند، در چپ قرار می گیرند. بر اساس مفهوم بهره برتر، این موضوع زمانی محقق می شود که بهره تابع افزوده شده با بهره جملات دیگر در تمامی فرکانسها مساوی و یا غالب باشد. بهره تابع افزوده شده طوری تعیین می شود که منحنی فاز تابع حلقه باز، در فاصله بین صفر تا ۱۸۰- درجه محدود شود. قید بهره برتر به دلیل اطمینان از عدم وجود صفرهای سمت راست در تابع حلقه باز سیستم کنترل، گذاشته می شود.

**کلمات کلیدی:** سیستمهای دارای تاخیر زمان، پیش بین کننده اسمیت، مقاومت، صفر سمت راست.

### A New Method to Improve the Robustness of Smith Predictor against Model Error

Mansoureh Esmeili, Mansour Shirvani

**Abstract:** In this paper a new method for compensating time delay is presented to improve the robustness of Smith method relative to the model error. This method is based on the dominant gain concept. In this method by knowing of the maximum error and use of the dominant gain concept for an added function, open loop control system is regulated, so that all of the zeros in the open loop, arising from the delay parameter are located in the left half plane. In this way the nonminimum phase characteristic of the open loop will become eliminated. Based on the dominant gain concept, the requirement of the method is that the gain of the added function becomes equal or higher compared to the other gains, at all or a wide high frequency range. The gain of the added function is determined so that the open loop transfer function phase is limited between zero and -180 degrees. This constraint is put to guarantee that no right half plane zero exists in the open loop transfer function.

**Keywords:** Time Delay Systems, Smith Predictor, Robustness, Right Half Plane Zero.

#### ۱- مقدمه

کنترل بر اساس استفاده از مدل فرآیند بوده و از ایده حذف پارامتر تاخیر زمان از تابع حلقه باز سیستم کنترل استفاده می کند. این روش دارای مشکلاتی نظیر حساسیت زیاد نسبت به خطای مدل، بخصوص حساسیت نسبت به خطای پارامتر تاخیر زمان [4-6] ایجاد افت کنترل<sup>۱</sup> به هنگام بروز آشفتگی در کنترل فرآیندهای انتگرالی [7-10] و عدم توانایی برای کنترل فرآیندهای ناپایدار می باشد [11]. بسیاری از محققان برای رفع این مشکلات روشهای مختلفی ارائه داده اند که به

تأخیر زمان در بسیاری از سیستمها از قبیل سیستمهای فرآیندی، بیولوژیکی، مکانیکی و علوم مهندسی وجود دارد [1]. در کنترل، وجود تاخیر زمان در حلقه های کنترل یکی از عوامل ناپایدار کننده و کاهش کیفیت کنترل محسوب می شود. اثرات وجود تاخیر زمان در حلقه کنترل، در نمودار فاز حلقه باز به صورت غیر مینیمم فاز شدن رفتار آن بروز می کند [1, 2]. اولین بار اسمیت برای کنترل سیستمهای دارای تاخیر زمان، روشی ارائه داد [3]. روش او در حقیقت یک روش

<sup>۱</sup> Offset

$$Y'' = Y' + Y = m(s)G(s)(1 - e^{-sT_d}) + m(s)G(s)e^{-sT_d} = m(s)G(s)$$

بدین ترتیب پارامتر تاخیر زمانی از سیگنال ورودی به کنترل کننده حذف می شود و نهایتاً معادله مشخصه مربوط به روش اسمیت به صورت رابطه (۲) خواهد شد.

$$1 + G_c(s)G_0(s) = 0$$

در رابطه بالا پارامتر تاخیر زمانی از معادله مشخصه حذف شده است. اما عملاً به واسطه وجود خطای مدل، حذف کامل اثرات تاخیر زمان از معادله مشخصه اتفاق نمی افتد و تابع پیچیده تری که در آن دو پارامتر تاخیر زمان وجود دارد، حاصل می گردد. این مطلب در معادله ۳ نشان داده شده است.

$$1 + \underbrace{G_c(s)G(s) + G_c(s)[-G(s)e^{-sT_d} + G_{p0}(s)e^{-sT_d}]}_{Open\ loop} = 0$$

وجود پارامتر تاخیر زمان در یک معادله، به معنای ظهور صفرهایی در سمت چپ و یا راست است که با استفاده از مفهوم بهره برتر، موقعیت این صفرها را می توان به راحتی تشخیص داد [27].

### تعریف مفهوم بهره برتر:

مفهوم بهره برتر بیان می کند که در توابعی مانند معادله ۳ که به نام شبه چند جمله ای<sup>۱</sup> شناخته شده اند، رفتار کلی شبه چند جمله ای، در هر بازه فرکانسی، همواره پیرو رفتار ترمی است که دارای بهره برتر باشد. به عنوان مثال اگر تابع با بهره برتر دارای رفتار مینیمم فاز باشد، شبه چند جمله ای، رفتار مینیمم فاز گرفته و این به مفهوم عدم وجود صفر سمت راست در شبه چند جمله ای است. همچنین اگر در شبه چند جمله ای، ترم دارای بهره برتر، رفتار غیر مینیمم فاز داشته باشد، شبه چند جمله ای رفتار غیر مینیمم فاز خواهد داشت که به معنای وجود صفر سمت راست، در شبه چند جمله ای است. در شرایطی که بهره ترمها با یکدیگر مساوی باشند، اگر یکی از ترمها دارای رفتار مینیمم فاز باشد، رفتار کلی شبه چند جمله ای مینیمم فاز خواهد شد.

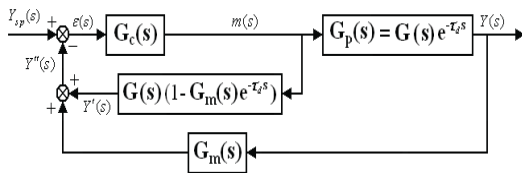
بنابراین اگر در معادله مشخصه حلقه های کنترل دارای تاخیر زمان بتوان شرایطی را به وجود آورد که بهره توابع دارای رفتار مینیمم فاز در همه فرکانسها یا اغلب آنها برتر و یا مساوی بهره توابع غیر مینیمم فاز گردد، رفتار کلی تابع حلقه باز، مینیمم فاز خواهد شد و این به معنای انتقال کلیه صفرهای سمت راست به سمت چپ و تبدیل رفتار غیر مینیمم فاز به مینیمم فاز و در نتیجه رفع ناپایداری از حلقه کنترل است. روشهای نورمی-ریکو و کاماچو [13] و کایا [25] از جمله روشهای مقاوم کردن روش اسمیت می باشند که در سالهای اخیر ارائه شده اند. روش نورمی-ریکو و کاماچو در شکل ۲ نشان داده شده است.

### Dead Time Compensators (DTCs) معروف شده اند [7-18].

برای مقاوم کردن روش اسمیت در مقابل خطای مدل نیز روشهای متعددی در سالهای اخیر ارائه شده است. بعضی از این روشها از طریق انتخاب پارامترهای مناسب برای کنترل کننده [19-25] و بعضی دیگر از طریق استفاده از یک فیلتر [13,16] روش اسمیت را در مقابل خطا، مقاوم می کنند. اما همه این روشها برای یک مدل از پیش تعیین شده که غالباً یک مدل درجه یک و یا حداکثر درجه دو می باشد، طراحی شده اند. در [26] روش جدیدی برای کنترل فرآیندهای دارای تاخیر زمان ارائه شده است. این روش بر اساس مفهوم بهره برتر می باشد که در [27] به صورت مفصل راجع به آن توضیح داده شده است. با توجه به اینکه روش ارائه شده در [26] در مقابل خطا بسیار مقاوم می باشد، می توان به این نتیجه دست یافت که از مفهوم بهره برتر می توان در مقاوم کردن روش اسمیت نسبت به خطای مدل استفاده شایانی کرد. بر این اساس در این مقاله، بر پایه مفهوم بهره برتر، روشی جدید برای مقاوم کردن روش اسمیت در مقابل خطا ارائه می شود.

## ۲- تحلیل حساسیت روش اسمیت نسبت به خطای مدل و روشهای مقاوم کردن آن از دیدگاه مفهوم بهره برتر

در کنترل فرآیندهای دارای تاخیر زمانی دسترسی به مدل فرآیند برای پیش بینی کردن سیگنالها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. روش پیش بین کننده اسمیت یکی از روشهای رایج کنترل سیستمهای دارای تاخیر زمانی است که بر اساس پیش بینی مدل فرآیند ابداع شده است [3]. ساختار کنترل در این روش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار کنترل در پیش بین کننده اسمیت [3]

در این روش، اسمیت از یک پیش بین کننده استفاده می کند. این پیش بین کننده، سیگنال ورودی به کنترل کننده را به نحوی تغییر می دهد که پارامتر تاخیر زمانی در معادله مشخصه بطور کامل از بین برود. بدین ترتیب بر اساس سیگنال ورودی به کنترل کننده می توان مقادیر مناسبتری برای پارامترهای کنترل کننده انتخاب نمود.

در شکل ۱ اگر فرض کنیم اغتشاش ورودی به سیستم مساوی صفر است و  $G_p = G e^{-sT_d}$  و همچنین سیگنال ورودی به مقایسه کننده که نهایتاً وارد کنترل کننده می شود را با  $Y''$  نمایش دهیم، داریم:

<sup>۱</sup> Quasi polynomial

شود که معادله مشخصه دارای بینهایت صفر شود. و تنها اگر این صفرها در سمت چپ قرار گیرند می توان به پایداری حلقه اطمینان داشت. مطابق مفهوم بهره برتر، این حالت تنها زمانی امکان دارد که بهره توابع دارای رفتار مینیمم فاز، بر توابع دارای رفتار غیر مینیمم فاز در همه فرکانسها و یا حداقل، اغلب فرکانسها برتری داشته و یا مساوی آن باشد [27]. شرایط به وجود آمدن حالت مذکور در معادله ۷ آورده شده است. در این معادله  $G_n(s)$  مدل اسمی فرآیند است.

$$|G_{mb}(j\omega) + G_c(j\omega)G(j\omega)| \geq |G_c(j\omega)G_c(j\omega) + G_p(j\omega)G_c(j\omega)|$$

بنابراین مقدار بهره در تابع  $G_{mb}(s)$  را به نحوی انتخاب می کنیم که شرایط بهره برتر برقرار بوده و بدین ترتیب رفتار حلقه باز سیستم کنترل تحت الشعاع آن قرار گرفته و مینیمم فاز شود.

### ۴- بررسی مقاومت روش پیشنهادی نسبت به

#### خطای مدل

**قضیه: در روش پیشنهادی، مقاومت روش اسمیت در مقابل خطای مدل، با افزایش بهره تابع  $G_{mb}(s)$  و در روش نورمی-ریکو و کاماچو، از طریق افزایش ثابت زمانی فیلتر  $F(s)$  افزایش می یابد.**

اثبات: معادله مشخصه سیستم کنترل در روش پیشنهادی به صورت رابطه ۸ می باشد:

$$1 + G_{mb}(s) + G_c(s)G(s)(1 - e^{-st_d}) + G_p(s)G_c(s) = 0$$

حال اگر مدل واقعی فرآیند را با رابطه  $G_p(j\omega) = G_n(j\omega) + \delta G_p(j\omega)$  نمایش دهیم در این صورت  $G_n(j\omega) = G(j\omega)e^{-st_d}$  عدم قطعیت در مدل و  $\delta G_p(j\omega)$  مدل اسمی فرآیند می باشند. با جاگذاری این روابط در معادله ۸ داریم:

$$1 + G_{mb}(j\omega) + G_c(j\omega)G(j\omega) - G_c(j\omega)G_n(j\omega) + (G_n(j\omega) + \delta G_p(j\omega))G_c(j\omega) = 0$$

بنابراین نرم باند ناحیه عدم قطعیت<sup>۱</sup> به منظور پایدار نگه داشتن حلقه بسته کنترل، در روش پیشنهادی به صورت زیر به دست می آید:

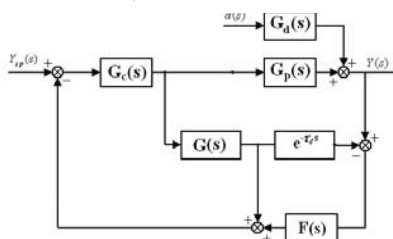
$$|\delta G(j\omega)|_p = \frac{|1 + G_{mb}(j\omega) + G_c(j\omega)G(j\omega)|}{|G_c(j\omega)|}$$

به طریق مشابه می توان این نرم را برای روشهای اسمیت و نورمی-ریکو و کاماچو به دست آورد. که به ترتیب معادلات ۱۱ و ۱۲ می باشند:

$$|\delta G(j\omega)|_s = \frac{|1 + G_c(j\omega)G(j\omega)|}{|G_c(j\omega)|}$$

$$|\delta G(j\omega)|_N = \frac{|1 + G_c(j\omega)G(j\omega)|}{|F(j\omega)G_c(j\omega)|}$$

در این روش با کاربرد فیلتر  $F(s)$  که یک تابع انتقال درجه یک می باشد، روش اسمیت در مقابل خطای مدل مقاوم می شود.

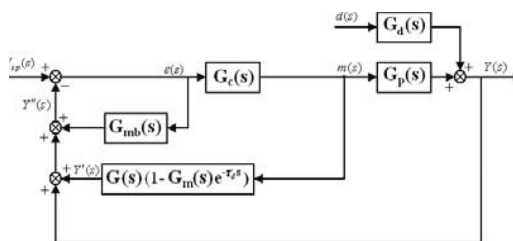


شکل ۲. روش نورمی-ریکو و کاماچو [13]

در حالیکه روش کایا تنها بر اساس تنظیم پارامترهای کنترل کننده، روش اسمیت را در مقابل خطای مدل مقاوم می کند. روشهای فوق در مثالهایی که در ادامه مقاله آورده خواهد شد، بیشتر توضیح داده خواهند شد.

### ۳- ساختار روش پیشنهادی

ساختاری که در این مقاله برای مقاوم کردن روش اسمیت ارائه شده است در شکل ۳ نمایش داده شده است. پاسخ حلقه بسته سیستم کنترل به تغییر در مقدار مقرر و رفع آشفتگی ایجاد شده در سیستم کنترل به ترتیب در معادلات ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۳. روش پیشنهادی

$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = \frac{G_p(s)G_c(s)}{1 + G_{mb}(s) + G_c(s)G(s)(1 - e^{-st_d}) + G_p(s)G_c(s)}$$

$$\frac{Y(s)}{d(s)} = \frac{G_d(s) + G_{mb}(s)G_d(s) + G_d(s)G(s)(1 - e^{-st_d})G_c(s)}{1 + G_{mb}(s) + G_c(s)G(s)(1 - e^{-st_d}) + G_p(s)G_c(s)}$$

می توان با استفاده از معادله (۴) مقدار نهایی پاسخ به یک تغییر پله ای واحد در مقدار مقرر را پیش بینی کرد. اگر کنترل کننده یک کنترل کننده PI باشد این مقدار برابر با  $1/K_m$  می شود، که در اینجا  $K_m$  بهره المان اندازه گیر می باشد. از معادله ۵ نیز می توان مقدار افت کنترل به هنگام ایجاد آشفتگی را به دست آورد که این مقدار برابر صفر می باشد.

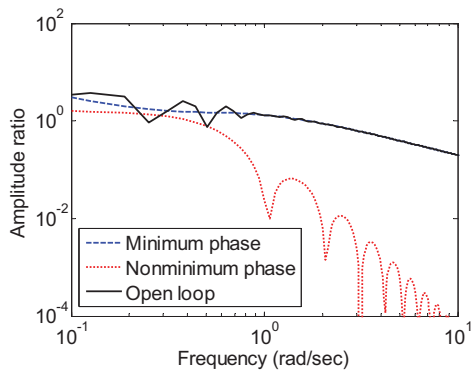
معادله حلقه باز سیستم کنترل شکل ۳ به صورت معادله ۶ است:

$$open\ loop = G_{mb}(s) + G_c(s)G(s)(1 - e^{-st_d}) + G_p(s)G_c(s)$$

در بررسی پایداری شبه چند جمله ایهای دارای پارامتر تاخیر زمان به این موضوع اشاره شده است که وجود پارامتر تاخیر زمان باعث می

<sup>1</sup> The norm bound uncertainty region

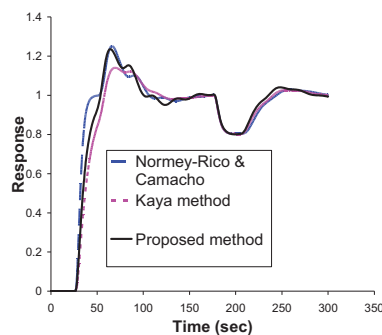
از حد مقاوم شدن پاسخ، این بهره را حداقل بهره دارای شرایط رابطه ۷ در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است که مقدار بهره و تاخیر زمان تابع فرآیند  $G_p(s)$  در رابطه ۷، بالاترین مقدار خطا در بهره و تاخیر زمان تابع فرآیند در نظر گرفته می‌شود تا بالاترین حد خطا نیز پوشش داده شود. در مورد این مثال  $G_{mb}(s) = \frac{2}{s+1}$  به دست می‌آید. در شکل ۴ نمودار نسبت دامنه برای توابع دارای رفتار مینیمم فاز  $G_c(s)G(s) + G_{mb}(s)$  و توابع دارای رفتار غیر مینیمم فاز  $G_c(s)G(s) + G_p(s)G_c(s) - G_c(s)G_n(s)$  تابع حلقه باز ترسیم شده است.



شکل ۴. نمودار نسبت دامنه جهت تعیین مقدار بهره  $G_{mb}(s)$

همانطور که در این شکل دیده می‌شود با انتخاب بهره ۲ برای  $G_{mb}(s)$ ، شرایط بهره برتر در تابع حلقه باز سیستم کنترل، همواره صادق است.

پاسخهای مربوط به روشهای مختلف برای تاخیر زمان ۲۶ ثانیه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار پاسخهای مربوط به روشهای مختلف برای تاخیر زمان ۲۶ ثانیه در جدول ۱ مقادیر انتگرال خطا برای روشهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند. همانطور که در این جدول دیده می‌شود این مقادیر برای روش مورد نظر از همه روشها کمتر است.

با توجه به اینکه روش کایا، تغییری در ساختار روش اسمیت ایجاد نمی‌کند و تنها از طریق تنظیم پارامترهای کنترل کننده، روش اسمیت را در مقابل خطای مدل مقاوم می‌کند بنابراین نرم این روش همان نرم روش اسمیت است. از مقایسه معادلات بالا می‌توان به این نتیجه رسید که نرم باند ناحیه عدم قطعیت در روش پیشنهادی با اضافه کردن تابع  $G_{mb}(s)$  در صورت و در روش نرمی-ریکو و کاماچو با اضافه کردن تابع  $F(s)$  در مخرج، نسبت به روش اسمیت افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه این نرم، معیاری برای سنجیدن مقاومت روش در مقابل خطای  $F(s)$  باشد لذا هر چه اندازه  $G_{mb}(s)$  در روش پیشنهادی و ثابت زمانی  $F(s)$  در روش نرمی-ریکو و کاماچو بیشتر باشد اندازه این نرم بزرگتر بوده و سیستم کنترل می‌تواند در مقابل خطاهای بیشتری، مقاومت نشان دهد.

## ۵- شبیه سازی

در این بخش با استفاده از مثالهایی، کاربرد و مزایای استفاده از روش پیشنهادی را نشان خواهیم داد.

مثال ۱. در این مثال یک تابع انتقال فرآیندی با درجه بالا را در نظر می‌گیریم. این تابع انتقال در [25] آورده شده است و ذکر شده است که در این مورد، روش کایا نسبت به روشهایی که در [28-31] معرفی شده اند بهتر عمل می‌کند. این تابع فرآیندی

$$G_p(s) = \frac{e^{-20s}}{(3s+1)(2s+1)(s+1)(0.5s+1)}$$

[25] ذکر شده است که این تابع را می‌توان با تابع درجه یک

$$G_m(s) = \frac{e^{-23.28s}}{(3.67s+1)}$$

زمان از ۲۰ تا ۲۶ می‌باشد. برای چنین تابعی در [25] پارامترهای کنترل کننده به صورت  $G_c(s) = 0.315 + \frac{0.086}{s}$  به دست آمده اند. اگر

بخواهیم پاسخ این روش را با روش پیشنهادی و روش نرمی-ریکو و کاماچو مقایسه کنیم از روش تنظیم ذکر شده در [28] استفاده کرده و بدین ترتیب پارامترهای کنترل کننده به صورت

$$G_c(s) = 1 + \frac{0.27}{s} \quad \text{و} \quad F(s) = \frac{1}{10s+1}$$

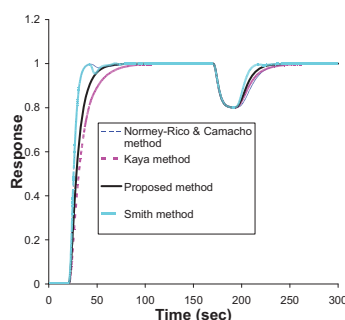
دست آمدند. در روش پیشنهادی، از روش تنظیم ذکر شده در [28] استفاده شد اما تابع انتقال فرآیند همان  $G_p(s)$  در نظر گرفته شده و از تابع مدل درجه یک به هیچ وجه استفاده نشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت یکی از مزایای روش پیشنهادی این است که در روش پیشنهادی نیازی به بدست آوردن مدل فرآیندی با درجات پایین نیست.

جهت به دست آوردن تابع  $G_{mb}(s)$ ، درجه این تابع را ۱ انتخاب می‌کنیم. همانطور که می‌دانیم در یک تابع درجه یک، دو پارامتر بهره و ثابت زمانی نامشخص می‌باشند. برای سادگی کار، ثابت زمانی را ۱ در نظر گرفته و مقدار بهره را طوری تعیین می‌کنیم که در تابع حلقه باز همواره شرایط بهره برتر صادق باشد (رابطه ۷). برای جلوگیری از بیش

جدول ۱. مقادیر انتگرال خطا برای روشهای مختلف در شکل ۵

نام روش	IAE	ISE
روش نورمی-ریکو و کاماچو	۴۸/۶	۳۷/۹
روش کایا	۵۰/۱۱	۳۷/۳
روش پیشنهادی	۴۵/۵۶	۳۲/۳

در شکل ۶ پاسخ روشهای مختلف هنگامیکه هیچ خطایی وجود ندارد با یکدیگر مقایسه شده اند.



شکل ۶. نمودار پاسخ روشهای مختلف هنگامیکه هیچ خطایی وجود ندارد

در جدول ۲ مقادیر انتگرال خطای پاسخها، درج شده اند. همانطور که اعداد نشان می دهند روش پیشنهادی از تمامی روشها، مقادیر کمتری نشان می دهد.

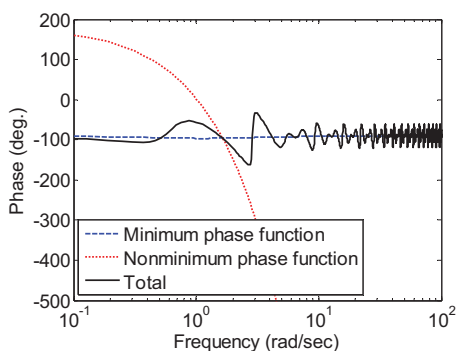
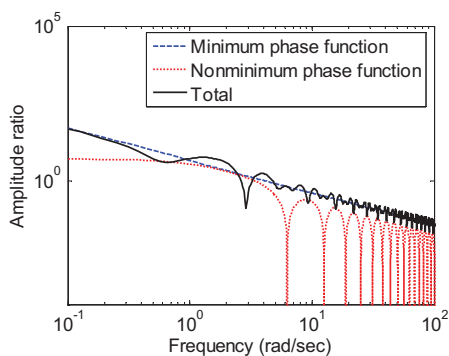
جدول ۲. مقادیر انتگرال خطا برای روشهای مختلف در شکل ۶

نام روش	IAE	ISE
روش نورمی-ریکو و کاماچو	۴۲	۳۵/۹
روش کایا	۴۴/۴۳	۳۴/۴
روش پیشنهادی	۳۴/۵۴	۲۷/۷

نکته دیگری که در این مثال باید به آن اشاره کرد این است که تابع مینیمم فاز در تابع حلقه باز سیستم کنترل در این مثال، برای همه روشها یک تابع درجه یک است. در [28] ذکر شده است که به دلیل سهولت در عملکرد، از توابع درجه یک تقریبی بجای توابع با درجات بالا استفاده می شود اما بر اساس مفهوم بهره برتر همانطور که قبلا نیز ذکر شد انتخاب تابع درجه یک به عنوان مدل می تواند باعث پایداری و محدود شدن منحنی فاز تابع حلقه باز، بین مقدار صفر و  $-180$  درجه شود.

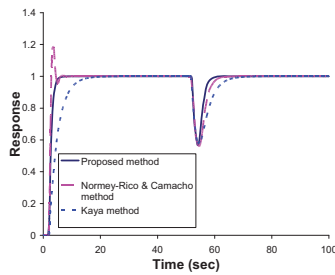
مثال ۲. در این شبیه سازی تابع فرآیند مورد نظر  $G_p = \frac{5e^{-3s}}{s+1}$  و مدل اسمی آن  $G_n = \frac{5e^{-2s}}{s+1}$  در نظر گرفته می شوند. برای مدل اسمی چنین فرآیندی پارامترهای کنترل کننده مطابق [17] به صورت

$G_c = 0.2 + \frac{1}{s}$  به دست آمدند. اگر با چنین کنترل کننده ای بخواهیم فرآیند واقعی را کنترل کنیم، فرآیند ناپایدار می شود. بنابراین در چنین مواردی تنها می توان از روشهایی که روش اسمیت را مقاوم می کنند، استفاده کرد. در روش پیشنهادی در این مقاله ابتدا باید بهره تابع  $G_{mb}(s)$  را تعیین نمود. این بهره را باید طوری تعیین کرد که تابع دارای رفتار مینیمم فاز در حلقه باز سیستم کنترل (معادله ۶) در تمامی فرکانسها و یا حداقل در دامنه وسیعی از فرکانسهای بالا، به نحویکه منحنی فاز تابع حلقه باز در محدوده صفر تا  $-180$  درجه قرار گیرد، دارای بهره برتر باشد. برای ارضای شرط بهره برتر، حداقل بهره ای که می توان انتخاب کرد ۳ می باشد که بدین ترتیب تابع  $G_{mb} = \frac{3}{s+1}$  انتخاب می شود. در شکل ۷ نمودار بد تابع حلقه باز روش پیشنهادی ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۷ دیده می شود هر چند در فرکانسهای خیلی کم (کمتر از ۱)، نسبت دامنه تابع دارای رفتار غیر مینیمم فاز بیشتر از تابع با رفتار مینیمم فاز است اما نمودار فاز تابع حلقه باز قبل از رسیدن به  $-180$  درجه محدود شده است.



شکل ۷. نمودار بد برای تابع حلقه باز روش پیشنهادی در مثال ۲

در روش نورمی-ریکو و کاماچو چون درصد خطای تاخیر زمان، بالای  $30\%$  درصد است، فرمول خاصی برای تعیین ثابت زمانی فیلتر وجود ندارد. اگر در این مثال  $T_f = \frac{t_d}{2} = 0.5$  در نظر گرفته شود پاسخ ناپایدار می شود لذا برای افزایش مقاومت آن،  $T_f = 1.5$  تعیین شد.



شکل ۹. نمودار پاسخهای مربوط به روشهای مختلف در مثال ۲ هنگامیکه خطایی وجود ندارد

همانطور که در این شکل نشان داده شده است روش کایا باز هم نسبت به روشهای دیگر بسیار دیر به مقدار مقرر می رسد.

در جدول ۴ مقادیر انتگرال خطا برای روشهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۴. مقادیر انتگرال خطا برای روشهای مختلف در شکل ۹

نام روش	IAE	ISE
روش نورمی-ریکو و کاماچو	۱۱	۹/۵۴
روش کایا	۱۱/۲۵	۹/۳۷
روش پیشنهادی	۸/۵	۷/۱۶

## ۶- نتیجه گیری

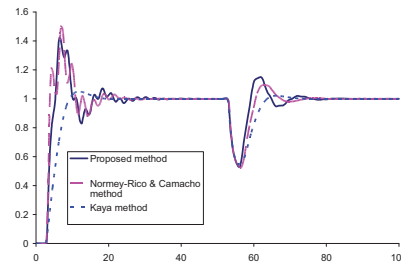
در روش پیشنهادی بر اساس محدوده عدم قطعیت مدل، با افزودن یک تابع درجه یک با بهره ای تعیین شده که باعث حذف صفرهای سمت راست تابع حلقه باز شود، روش اسمیت نسبت به خطای مدل مقاوم می شود. پاسخهای نشان داده شده در شبیه سازیها نشان می دهند که پاسخهای این روش در مقایسه با روشهای دیگر بهتر می باشد. همچنین مزیت دیگر این روش این است که برای مدل‌های با درجات بالا مستقیماً قابل کاربرد بوده و نه تنها نیاز به پیدا کردن مدل‌های با درجات پایین ندارد بلکه نسبت به روشهایی که با این مدل‌ها کار می کنند عملکرد بهتری نشان می دهد.

## مراجع

- [1] Richard J. P. 2003. Time-delay systems: "an overview of some recent advances and open problems", *Automatica*, 39(10), 1667-1694.
- [2] Normey-Rico J.E. & Camacho F., Eduardo. 2008. Dead-time compensators: A survey. *Control Engineering Practice*, 16(4), 407-428.
- [3] Smith, O. J. M. A controller to overcome dead time. *ISA Journal* 1959; 6(2): 28-33.

نکته ای که در این قسمت باید مطرح کرد این است که یکی از مزایای روش پیشنهادی این است که در روش پیشنهادی درصد خطا در پارامترهای مدل، هر عددی می تواند باشد تنها کافی است که پارامترهای حلقه باز را طوری تعیین کنیم که حداقل شرایط رابطه ۷، برقرار باشد.

همانطور که قبلاً نیز توضیح داده شد در روش کایا با تنظیم پارامترهای کنترل کننده، حلقه کنترل، در مقابل تغییرات پارامترهای مدل مقاوم می شود. در این روش با استفاده از قوانینی که در [25] آورده شده است، کنترل کننده  $G_c = \frac{1}{15} + \frac{1}{15s}$  به دست می آید. در شکل ۸ مقایسه ای بین پاسخ روشهای ذکر شده، انجام شده است.



شکل ۸. نمودار پاسخهای مربوط به روشهای مختلف در مثال ۲

در جدول ۳ مقادیر انتگرال خطا در روشهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۳. مقادیر انتگرال خطا برای روشهای مختلف در شکل ۸

نام روش	IAE	ISE
روش نورمی-ریکو و کاماچو	۴۲	۳۵/۹
روش کایا	۴۴/۴۳	۳۴/۴
روش پیشنهادی	۳۴/۵۴	۲۷/۷

همانطور که در این جدول دیده می شود روش پیشنهادی نسبت به روشهای دیگر کمترین مقادیر را دارد. روش کایا به دلیل اینکه مقادیر احتیاط آمیزی برای کنترل کننده انتخاب شده است، بسیار مقاوم عمل کرده و به همین دلیل خیلی دیرتر از روشهای دیگر به مقدار مورد نظر می رسد. روش نورمی-ریکو و کاماچو نیز دارای پاسخی بسیار نوسانی و با فرافرت زیاد است. لازم به ذکر است که در حلقه کنترل، در ثانیه صفر در مقدار مقرر یک تغییر پله ای ایجاد شده و در ثانیه ۵۰، آشفتنگی برابر با ۰.۱- بر سیستم اعمال شده است.

در شکل ۹ پاسخهای روشهای مورد نظر هنگامیکه در مدل هیچ خطایی وجود ندارد نشان داده شده است.

- [17] Majhi, S. and D. P. Atherton. 2000, "Obtaining Controller Parameters for a New Smith Predictor Using Auto Tuning". *Automatica*; 36(11): 1651-1658.
- [18] Kaya, I. 2003, "Obtaining Controller Parameters for a New PI-PD Smith Predictor Using Auto tuning", *Journal of Process Control* , 13(5): 465-472.
- [19] Morari, M., and F. Zafiriou. 1989. Robust Process Control. Prentice-Hall, NJ.
- [20] Santacesaria, C., & Scattolini, R. 1993, "Easy tuning of Smith predictor in presence of delay uncertainty", *Automatica*, 29, 1595-1597.
- [21] Palmor, Z. J., & Blau, M. 1994, "An auto tuner for Smith dead time compensator", *International Journal of Control*, 60, 117-135.
- [22] Lee, T. H., Wang, Q. G., & Tan, K. K. 1996, "Robust Smith predictor controller for uncertain delay systems", *AIChE Journal*, 42(4), 1033-1040.
- [23] Lee, D., Lee, M., Sung, S., Lee, I., Robust PID tuning for Smith predictor in the presence of model uncertainty. *Journal of Process Control*, 1999, 9(1), 79-85.
- [24] Ingimundarson, A., & Hägglund, T. 2001, "Robust tuning procedure of Dead-time compensating controllers", *Control Engineering Practice*; 9(11): 1195-1208.
- [25] Kaya, I., 2004, "IMC based automatic tuning method for PID controllers in a Smith predictor configuration", *Computer and Chemical Engineering*, 28(3), 281-290.
- [26] M. Esmaeli, M. Shirvani, 2008, "A new method for time delay compensation in control systems", *IJCCE*, 27(4).
- [27] M. Esmaeli, M. Shirvani, "Exploiting distributed parameter process systems behaviors in frequency domain", *18th international congress of chemical and process engineering*, Chisa. Prauge Agust 2008.
- [28] Hägglund, T., 1996, "An industrial dead-time compensating PI controller", *Control Engineering Practice*, 4, 749-756.
- [29] Hang, C. C., Wang, Q. G., & Cao, L. S. 1995, "Self-tuning Smith predictors for processes with long dead time", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 9, 255-270.
- [30] Palmor, Z. J., & Blau, M. 1994, "An auto-tuner for Smith dead time compensator", *International Journal of Control*, 60(1), 117-135.
- [31] Benouarets, M., & Atherton, D. P. 1994. "Autotuning design methods for a Smith predictor control scheme", *In UKACC International Conference on Control 94* (pp. 795-800).
- [4] Palmor, Z. 1980. "Stability Properties of Smith Dead-Time Compensator Controllers", *Int. J. Control*, 32, 212.
- [5] Palmor, Z. J. 1996. "The control handbook. Time delay compensation: Smith predictor and its modification", Boca Raton and London: CRC Press and IEEE Press.
- [6] Michiels, W., & Niculescu, S. I. 2003. "On the delay sensitivity of smith predictors", *International Journal of Systems Science*, 34 (8-9), 543-552.
- [7] Watanabe, K., and M. Ito. 1981, "A Process - Model Control for Linear Systems with Time-Delay", *IEEE Trans. Automat. Contr.* AC - 26(6): 1261 - 1269.
- [8] Astrom, K., Hang, C. C., & Lim, B. C. 1994, "A New Smith Predictor for Controlling a Process with an Integrator and Long Dead-Time", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(2): 343-345.
- [9] Mataušek, M. R. and A. D. Micić. 1996, "A modified Smith Predictor for Controlling a Process with an Integrator and Long Dead-Time", *IEEE Trans. Automat. Control*; 41(8): 1196-1203.
- [10] Mataušek, M. R. and A. D. Micić. 1999, "On the Modified Smith Predictor for Controlling a Process with an Integrator and Long Dead-Time", *IEEE Trans. Automat. Cont.*, 44(8): 1603-1606.
- [11] Xiang, Lu., Yang, Y., Wang, Q and Zheng, W., 2005 "A Double Two - Degree - of -Freedom Control Scheme for Improved Control of Unstable Delay Processes", *Journal of Process Control*; 15(5): 605 - 614.
- [12] Hägglund, T. 1992, "A predictive PI Controller for Processes with Long Dead-Times", *IEEE Contr. Syst. Mag.*; 12(1): 57 - 60.
- [13] Normey-Rico, J. E., Bordons, C., & Camacho, E. F. 1997, "Improving the robustness of Dead-time compensating PI controllers. *Control Engineering Practice*"; 5(6): 801-810.
- [14] Majhi, S. and D. P. Atherton. 1999 "Modified Smith Predictor and Controller for Processes with Time-Delay", *IEE Proc. Control Theory Appl.*; 146(5): 359-366.
- [15] Kaya, I. and D. P. Atherton. 1999, "A new PI - PD Smith Predictor for Control of Processes with Long Dead-Time", *in: 14th IFAC World Congress*, Vol. C: 283-288.
- [16] Normey-Rico, J. E., & Camacho, E. F. 1999, "Robustness effects of a prefilter in Smith predictor based generalized predictive controller", *IEE Proceedings Control Theory and Applications*, 146, 179-185.