



دهمین کنفرانس ملی مهندسی شیمی ایران

دانشگاه سیستان و بلوچستان
۲۶ - ۲۴ آبان ماه ۱۳۸۴

بررسی عملکرد کنترل کننده PID مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی

علی رضا ارجمندزاده*، فرهاد شهرکی^۱،
محمدعلی فنایی شیخ الاسلامی^۲

*دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشگاه نیکبخت، دانشکده مهندسی شیمی
^۱دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشگاه نیکبخت، دانشکده مهندسی شیمی
^۲دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

چکیده:

کنترل کننده های PID با توجه به سادگی و آشنایی اپراتورها بطور گسترده ای در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرند. به هر حال در صورت تنظیم نامناسب خصوصا در فرآیندهای با تاخیر انتقالی زیاد، کنترل کننده های PID دارای عملکرد نامناسبی می باشند. یکی از راههای اصلاح این نقیصه استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی در ساختار کنترل کننده می باشد. در این مقاله پس از بررسی ساختار شبکه عصبی برای کنترل کننده PID، عملکرد آن با کنترل کننده های مرسوم PID مورد مقایسه قرار گرفته است. به این منظور از دو روش مرسوم تنظیم تطبیقی PID شامل روش جایگزینی قطب (Pole Placement) و روش حذف قطب (Cancellation) استفاده شده است. کنترل کننده PID مبتنی بر شبکه عصبی، دارای ساختار شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) است که با روش پس انتشار خطا با ضریب عملکرد ثابت به صورت بلادرنگ (On-Line) آموزش داده می شود بنابراین عملکرد آن نیز به صورت خود تنظیم است. نتایج حاصله از شبیه سازی نشان می دهد که در فرآیند با تاخیر انتقالی زیاد کنترل کننده PID مبتنی بر شبکه عصبی دارای عملکرد بهتری در مقایسه با کنترل کننده های مرسوم PID می باشد و همچنین PID مبتنی بر شبکه عصبی حساسیت کمتری نسبت به خطای مدل سازی از خود نشان می دهد.

کلمات کلیدی: کنترل کننده PID تطبیقی، شبکه عصبی مصنوعی، فرآیند با تاخیر انتقالی زیاد

مقدمه:

کنترل کننده های PID همواره مورد توجه صنایع بوده و طراحان همواره در تلاش جهت اصلاح و ارتقاء عملکرد این کنترل کننده ها می باشند [۱] و [۲]. در طی تحقیقی که در بین بیش از ۱۱۰۰۰ کنترل کننده که در صنعت نفت و کاغذ مورد استفاده قرار گرفته اند مشاهده شده است که بیش از ۹۷ درصد از آنها ساختار PID دارند [۳]. از آنجایی که فرآیندها در عمل در شرایط کاری با تغییرات گسترده قرار می گیرند پایداری مقاوم (Robustness) کنترل کننده ها از اهمیت خاصی برخوردار است. کنترل کننده های PID از این قاعده مستثنی نیستند و طراحان تلاش زیادی در جهت ارتقاء این بعد از کنترل کننده های PID کرده اند [۴]. روشهای ارائه شده جهت کنترل کننده PID تطبیقی عموماً به فرآیندهای خطی محدود می شوند به عبارت دیگر یک کنترل کننده با مدل خطی در یک محدوده خطی عمل می کند اما قابلیت‌هایی که شبکه های عصبی در حل مسائل با پیچیدگی ریاضی زیاد دارند و همچنین قدرت زیاد این شبکه ها در تخمین زدن توابع، طراحان را بر آن داشت تا از این شبکه ها در طراحی کنترل کننده های خود تنظیم در کنترل فرآیندهای غیر خطی استفاده کنند. توجه به این موضوع که عموماً فرآیندهای شیمیایی از رفتاری غیر خطی برخوردارند این موضوع را پر اهمیت تر می کند. به عنوان مثال از شبکه های عصبی می توان جهت تقریب یک مدل خطی برای فرآیند جهت به روزرسانی پارامترهای کنترل کننده PID استفاده کرد [۵]. در مدل شبکه عصبی یک فرآیند اطلاعاتی از خود فرآیند گنجانده نمی شود از این رو شبکه ممکن است فرآیند را به گونه ای تخمین بزند که با قوانین پایه ای فیزیکی و ریاضی تناقض داشته باشد از این رو مدل‌های هیبرید مطرح می شوند به این معنا که اطلاعات معلوم و در دسترس مانند قوانین بقاء جرم و انرژی از یک فرآیند را در یک مدل بصورت روابط ریاضی و پارامترهای نامعلوم فرآیند به صورت یک شبکه عصبی مدل می شوند [۶]. علاوه بر این از کنترل کننده های با فرم شبکه عصبی هیبریدی به عنوان کنترل کننده تطبیقی مستقیم نیز می توان استفاده کرد [۷]. یکی از مهمترین ناتوانیهای کنترل کننده های PID بروز ضعف در کنترل فرآیندهای با تاخیر انتقالی نسبتاً زیاد است. در این مواقع کنترل کننده بایستی در بهره های پایین کار کند و لذا پاسخ کندی خواهد داشت. یکی از روشهای قدیمی اصلاح کنترل کننده PID برای فرآیندهای با تاخیر انتقالی زیاد روش پیش بینی اسمیت (Smith Predictor) [۸] می باشد اما این روش نیازمند در اختیار داشتن مدل نسبتاً دقیق از فرآیند است. در این

مقاله توانایی یک کنترل کننده PID مبتنی بر شبکه عصبی [۹] جهت کنترل فرآیندهای با تاخیر انتقالی زیاد مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد آن با دو روش تطبیقی دیگر با عنوان حذف قطبها [۱۰] و جایگزینی قطبها [۱۱] مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

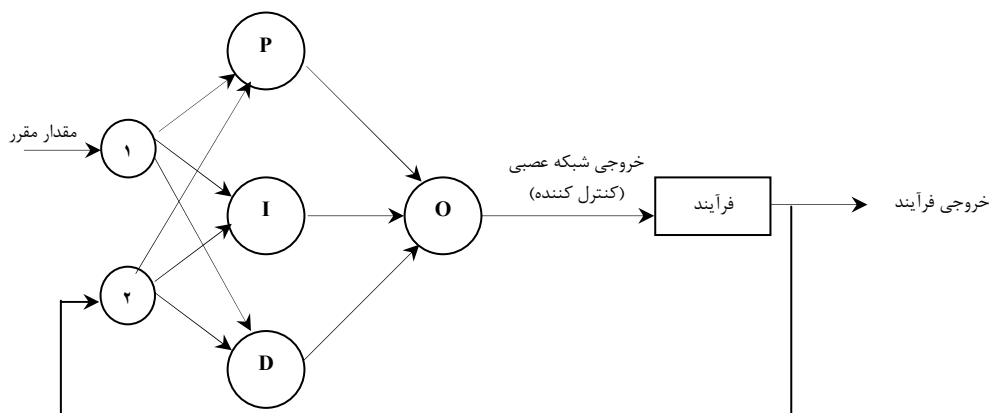
PID مبتنی بر شبکه عصبی هم از مزایای کنترل کننده PID و هم از مزایای شبکه های عصبی استفاده می کند. این کنترل کننده به صورت یک شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) است که در لایه ورودی دارای دو نرون از نوع P و در لایه مخفی خود از سه نرون P ، I و D برخوردار است. لایه خروجی نیز از یک نرون P تشکیل شده است. این شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک کنترل کننده مستقیم مورد استفاده قرار می گیرد و جهت تنظیم پارامترهای خود (وزنها) به صورت بلادرنگ از روش آموزش پس انتشار خطا با ضریب عملکرد ثابت استفاده می کند. با وجود مزایای اشاره شده برای این کنترل کننده، استفاده از ساختار پرسپترون چند لایه (MLP) به همراه آموزش پس انتشار خطا با ضریب عملکرد ثابت سبب ایجاد دینامیک کند برای این کنترل کننده شده است. بعلاوه در نقاطی که فرآیند دارای آشفتگی است عملکرد نامطمئنی از خود نشان می دهد.

در ادامه، ابتدا به ارائه ساختار کنترل کننده های PID تطبیقی مورد بحث می پردازیم و پس از آن به نتایج شبیه سازی ها و بررسی عملکرد کنترل کننده ها پرداخته می شود.

ساختار کنترل کننده های PID تطبیقی

PID مبتنی بر شبکه عصبی (PIDNN):

PID مبتنی بر شبکه عصبی دارای ساختار پیش خور (Feed Forward) است و همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده است در لایه ورودی از دو نرون نوع P، در لایه مخفی از سه نرون نوع P، I و D و در لایه خروجی از یک نرون نوع P تشکیل یافته است.



شکل (۱): ساختار شبکه عصبی مصنوعی PID

تابع تحریک نرون های نوع P، I و D به صورت زیر است:

نرون نوع P:

$$x_i(k) = u_i(k) \quad (1)$$

نرون نوع I:

$$x_i(k) = u_i(k) + x_i(k-1) \quad (2)$$

نرون نوع D:

$$x_i(k) = u_i(k) - u_i(k-1)$$

لایه ورودی:

از دو نرون با تابع تحریک نوع P تشکیل یافته است

لایه مخفی:

از سه نرون با تابع تحریک نوع P، I و D تشکیل یافته است. ورودی هر نرون به صورت

زیر است:

$$u'_j(k) = \sum_{i=1}^2 w_{ij} \cdot x_i(k) \quad (4)$$

لایه خروجی:

از یک نرون نوع P تشکیل یافته است. ورودی هر نرون به صورت زیر است:

$$u''(k) = \sum_{j=1}^3 w_{jo} \cdot x''_j(k) \quad (5)$$

در این شبکه عصبی مصنوعی از الگوریتم پس انتشار خطا با ضریب عملکرد ثابت جهت آموزش وزنها استفاده شده است. در الگوریتم آموزش در نظر گرفته شده برای این مقاله تابع عملکرد زیر در حال کمینه سازی است.

$$J = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m [r(k) - y(k)]^2 \quad (6)$$

الگوریتم کنترل کننده تطبیقی حذف قطبها و جایگزینی قطبها:

در این قسمت دو کنترل کننده ارائه شده توسط [۱۰] Denal و [۱۱] Tjorkro مورد بررسی قرار می گیرد. در هر دو کنترل کننده از فرم زیر جهت کنترل کننده PID استفاده شده است:

$$u(k) = u(k-1) + G(q^{-1})e(k) \quad (7)$$

$$G(q^{-1}) = g_0 + g_1q^{-1} + g_2q^{-2} \quad (8)$$

که در رابطه بالا $u(k)$ ورودی فرآیند و $e(k)$ خطای ورودی به کنترل کننده است. فرآیند نیز به فرم ARMA به صورت زیر مدل می شود:

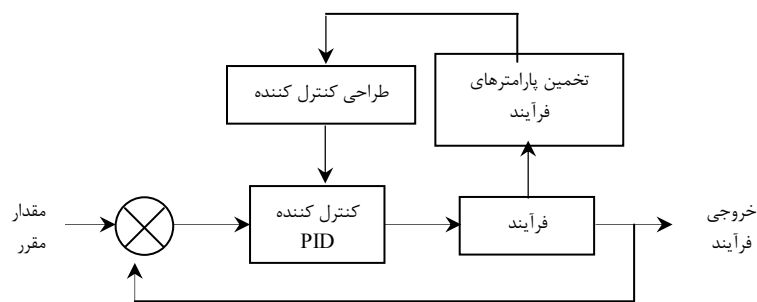
$$y(k) = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k) + v(k) \quad (9)$$

$y(k)$ خروجی فرآیند است و پارامترهای مدل فوق نیز به صورت زیر تعریف می شوند:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \quad (10)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m} \quad (11)$$

روشهای ارائه شده جهت کنترل یک فرآیند می توانند مستقیم و بدون نیاز به تخمین پارامترهای مدل فرآیند و یا غیرمستقیم و نیازمند به یک الگوریتم جهت شناسایی مدل فرآیند باشند. دو روش ارائه شده در این قسمت جزء دسته دوم یعنی غیرمستقیم هستند. نمودار جعبه ای یک کنترل کننده غیرمستقیم در شکل (۲) آورده شده است.



شکل (۲) - نمودار جعبه ای یک کنترل کننده غیرمستقیم

جهت تخمین پارامترهای مدل فرآیند از روش حداقل مربعات خطا RLS با فاکتور فراموشی متغیر [۱۲] برای هر دو کنترل کننده استفاده شده است. به این منظور در هر پریود نمونه گیری پارامترهای کنترل کننده بر مبنای پارامترهایی که توسط روش حداقل مربعات خطا تخمین زده شده است به روزرسانی می شود. حدس اولیه برای ماتریس کوواریانس به صورت زیر انتخاب شده است:

$$P(0) = 100I \quad (12)$$

که I در رابطه بالا ماتریس واحد است. هر کدام از الگوریتم کنترل کننده های مذکور دارای یک پارامتر طراحی است. مقدار این پارامتر به گونه ای تعیین می گردند تا مجموع قدرمطلق خطاها حداقل شود. جهت کمک به الگوریتم RLS در تمام شبیه سازی ها تا پریود ۱۰، ورودی های تصادفی به الگوریتم وارد می کنیم و پس از آن کنترل کننده وارد مدار می شود.

در الگوریتم حذف قطبها برای طراحی کنترل کننده پس از تخمین پارامترهای فرآیند کل دینامیک فرآیند به وسیله کنترل کننده حذف می شود اما در فرم تعمیم یافته آن [۱۰] قطبهای فرآیند بوسیله صفرهای کنترل کننده PID حذف می گردد ولی بجای حذف صفر فرآیند، پارامتر اول کنترل کننده به گونه ای محاسبه میگردد تا حاشیه فاز مطلوب تامین گردد. برای طراحی کنترل کننده به روش جایگزینی قطبها نیز روشهای ساده ای تاکنون ارائه شده است که در تمامی آنها فرآیند می بایست از درجه دوم باشد. در این قسمت روش ارائه

شده توسط Tjorkro [۱۱] به علت در نظر گرفتن حالت عمومی تر برای فرآیند مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش پارامترهای کنترل کننده به گونه ای تنظیم میگردد تا تابع تبدیل مدار بسته دارای یک قطب در محل مطلوب باشد.

شبیه سازی و تحلیل عملکرد کنترل کننده ها:

در این قسمت عملکرد PIDNN از طریق شبیه سازی کامپیوتری مورد بررسی قرار می گیرد و با دو روش مرسوم دیگر مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. در این مقاله تاثیر پارامترهای زیر مورد بررسی قرار خواهند گرفت:

(الف) تاثیر تاخیر انتقالی زیاد در مدل فرآیند

(ب) تاثیر محل قطبهای تابع تبدیل گسسته فرآیند

(ج) تاثیر تغییر مدل فرآیند تحت کنترل

(الف) تاثیر تاخیر انتقالی زیاد در مدل فرآیند :

در ابتدا حالتی را در نظر می گیریم که تاخیر انتقالی فرایند کم باشد. بعنوان مثال تابع تبدیل زیر را بعنوان مدل فرایند در نظر بگیریم

$$y(k) = \frac{(0.36q^{-1})u(k)}{1 - 0.8q^{-1} + 0.16q^{-2}} \quad (13)$$

پاسخ هر سه کنترل کننده جهت مقایسه در نمودار (۱-الف و ب) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می گردد روش حذف قطبها دارای بهترین عملکرد می باشد ولی کنترل کننده PIDNN دارای پاسخ کندی می باشد. کند بودن پاسخ PIDNN به دو علت است. علت اول ساختار پرسپترون چند لایه شبکه (MLP) و علت دوم نوع آموزش آن (پس انتشار خطا با ضریب عملکرد ثابت) است. البته با تغییر روش آموزش شبکه می توان پاسخ PIDNN را سریعتر کرد [۱۳ و ۱۴]. در ادامه حالتی را در نظر می گیریم که تاخیر انتقالی فرایند زیاد باشد. بعنوان مثال تابع تبدیل زیر را بعنوان مدل فرایند در نظر بگیریم:

$$y(k) = \frac{(0.632q^{-10})u(k)}{1 - 0.368q^{-1}} \quad (14)$$

روشهای حذف قطبهای تعمیم یافته و جایگزینی قطبها در کنترل چنین سیستمی از خود ضعف نشان می دهند و تنظیم پارامترهای آنها مشکل و سیستم نا پایدار می شود اما همانگونه که از نمودار (۲-الف و ب) مشخص می شود در صورت استفاده از کنترل کننده PID با مبنای شبکه عصبی سیستم کاملا پایدار می شود و با توجه به نمودار (۱-ج) تابع عملکرد شبکه عصبی به صورت یکنواخت و بدون نوسان در حال کاهش تا هنگام خاتمه آموزش است. از سوی دیگر با در نظر گرفتن نوع فرآیند که دارای تاخیر انتقالی زیاد است پاسخ سیستم نیز از سرعت مناسبی برخوردار است.

ب) تاثیر محل قطبهای تابع تبدیل گسسته فرآیند

فرآیند هایی با توابع تبدیل گسسته جدول (۱) در نظر می گیریم. در اولین فرآیند تابع تبدیل گسسته با قطبهای حقیقی و در دومین فرآیند تابع تبدیل گسسته با قطبهای مختلط و در سومین فرآیند تابع تبدیل گسسته با قطبهای موهومی در نظر گرفته شده است. با تغییر در مقدار مقرر رفتار کنترل کننده PID مبتنی بر شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در نمودارهای ۳، ۴ و ۵ آورده شده است.

همانگونه که در نمودارهای ۳، ۴ و ۵ به وضوح مشخص است PID مبتنی بر شبکه عصبی برای هر سه نوع فرآیند عملکرد خوبی از خود نشان می دهد حال آنکه دو روش دیگر با نزدیک شدن قطبها به دایره واحد عملکرد نا مناسبی از خود نشان می دهند و امکان ناپایداری در عملکرد آنها وجود دارد [۱] بنابراین PID مبتنی بر شبکه عصبی نسبت به محل قرار گرفتن قطبها حساسیت کمتری دارد.

جدول (۱) توابع تبدیل گسسته فرآیندها

مدل گسسته فرآیند	
$y(k) = \frac{(0.04q^{-1})u(k)}{1 - 1.6q^{-1} + 0.64q^{-2}}$	فرآیند I
$y(k) = \frac{(0.5q^{-1})u(k)}{1 - 0.99q^{-1} + 0.49q^{-2}}$	فرآیند II
$y(k) = \frac{(1.81q^{-1})u(k)}{1 + 0.81q^{-2}}$	فرآیند III

ج) حساسیت به تغییر در مدل فرآیند

تغییرات در مدل فرآیند شامل تغییر در درجه، تغییر در میزان تاخیر انتقالی و تغییر در پارامترهای مدل فرآیند است. بدین منظور از مثال ارائه شده در مقاله Clarke [۱۵] استفاده شده است. نحوه تغییرات مدل پیوسته فرآیند مطابق جدول (۲) است.

در شبیه سازی پرپود نمونه گیری برابر ۳ ثانیه در نظر گرفته شده است. هر شبیه سازی بدین صورت انجام گرفته که یکسری تغییرات پله ای به اندازه ۰،۴ در مقدار مقرر اعمال می شود. پرپود این تغییرات پله ای برابر ۵۰ در نظر گرفته شده است. مدل فرآیند نیز پس از هر ۲۰۰ پرپود نمونه گیری تغییر می کند. در مقایسه روشها برای دو روش جایگزینی قطبها و حذف قطبها که به تخمین پارامترهای فرآیند نیاز دارند در شرایط یکسان از روش RLS استفاده شده

است. برای روش حذف قطبها حاشیه فاز مطلوب ۴۳ درجه و محل قطب مطلوب برای روش جایگزینی قطبها ۰،۷۵ در نظر گرفته شده است.

همانطور که از نمودارهای ۷ و ۸ مشخص است PID مبتنی بر شبکه عصبی نسبت به تغییر در مدل در مقایسه با دو روش دیگر از حساسیت بسیار کمتری برخوردار است. همانگونه که از نمودار (۶-ج) مشاهده می شود کنترل کننده PID مبتنی بر شبکه عصبی به صورت یکنواخت و بدون نوسان تابع عملکرد خود را در هر مرحله تغییر مقدار مقرر تا خاتمه آموزش کاهش می دهد و کاملاً فرآیند پایدار است.

جدول (۲) توابع تبدیل پیوسته فرآیندها و ترتیب اعمال آنها

مدل پیوسته فرآیند	تعداد پریود نمونه گیری	ترتیب
$\frac{1}{1+10S+40S^2}$	۰-۲۰۰	۱
$\frac{e^{-3s}}{1+10S+40S^2}$	۲۰۰-۴۰۰	۲
$\frac{1}{1+10S}$	۴۰۰-۶۰۰	۳
$\frac{e^{-3s}}{1+10S}$	۶۰۰-۸۰۰	۴

نتیجه گیری:

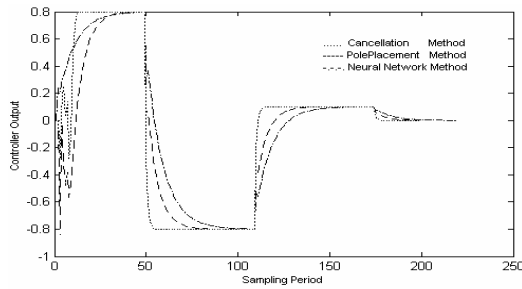
۱- نتایج شبیه سازی نشان می دهد که در مواقعی که تاخیر زمانی مدل فرآیند زیاد است تنظیم کنترل کننده های مرسوم خیلی مشکل است و عموماً واگرا می شوند ولی PID مبتنی بر شبکه عصبی به خوبی چنین فرآیندهایی را کنترل میکند

۲- در مواقعی که تاخیر زمانی مدل فرآیند کم است کنترل کننده PID مبتنی بر شبکه عصبی علی رغم پایدار بودن پاسخ کندی دارد اما کنترل کننده های جایگزینی قطبها و حذف قطبها از دینامیک سریعتری برخوردارند.

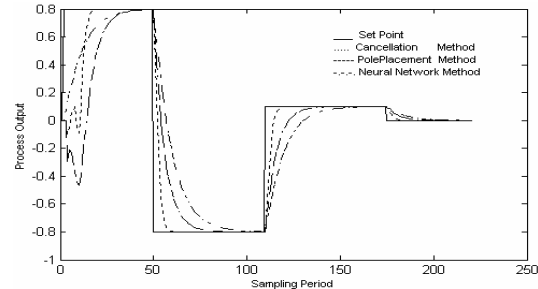
۳- PID مبتنی بر شبکه عصبی نسبت به تغییر در محل قطبهای تابع تبدیل گسسته مدل فرآیند حساسیت کمتری در مقایسه با دو روش دیگر از خود نشان می دهد حال آنکه دو روش حذف قطبها و جایگزینی قطبها با تغییر در محل قطبهای تابع تبدیل گسسته مدل فرآیند امکان ناپایدار شدن را نیز دارند.



۴- کنترل کننده PID مبتنی بر شبکه عصبی نسبت به تغییر در مدل فرآیند حساسیت به مراتب کمتری نسبت به دو روش دیگر از خود نشان می دهد به عبارت دیگر PIDNN نسبت به خطای مدل سازی مقاومتر است.

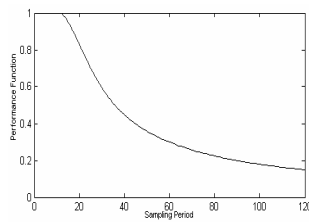


(ب)

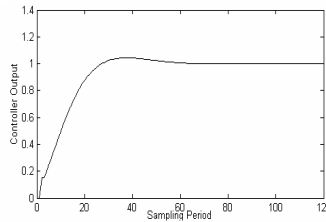


(الف)

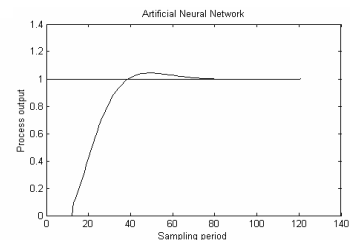
نمودار (۱) مقایسه عملکرد هر سه کنترل کننده در فرآیند بدون تاخیر انتقالی (الف) خروجی فرآیند و مقدار مقرر (ب) خروجی کنترل کننده



(ج)

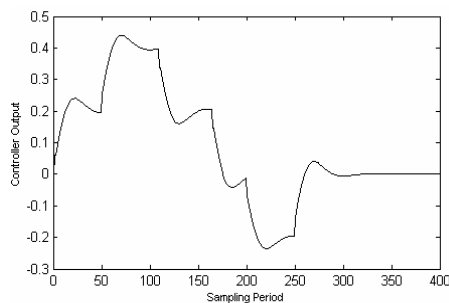


(ب)

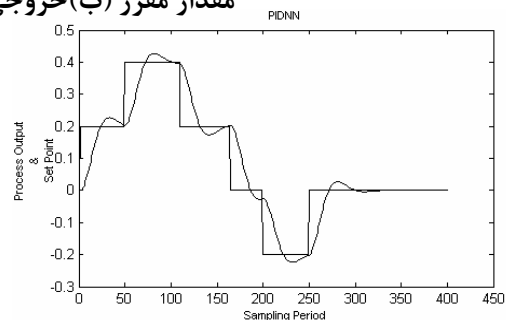


(الف)

نمودار (۲) کنترل کننده PIDNN روی فرآیند با تاخیر انتقالی زیاد: (الف) خروجی فرآیند به همراه مقدار مقرر (ب) خروجی کنترل کننده (ج) تابع عملکرد

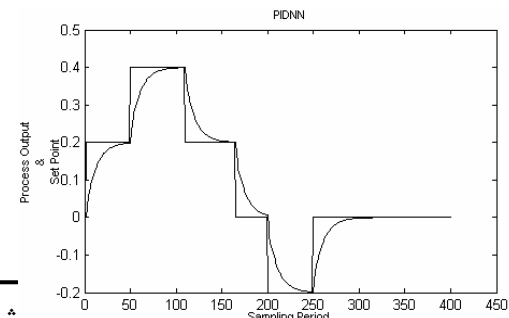
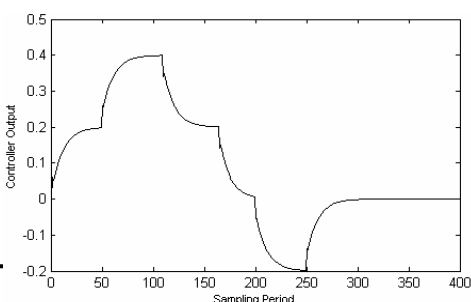


(ب)



(الف)

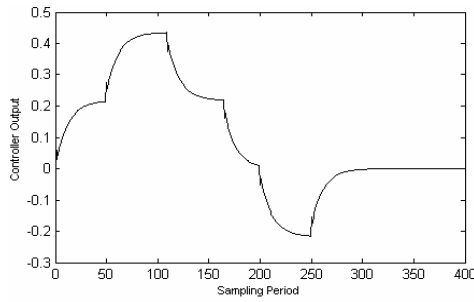
نمودار (۳) کنترل کننده PIDNN روی فرآیند I (الف) خروجی فرآیند (ب) خروجی کنترل کننده



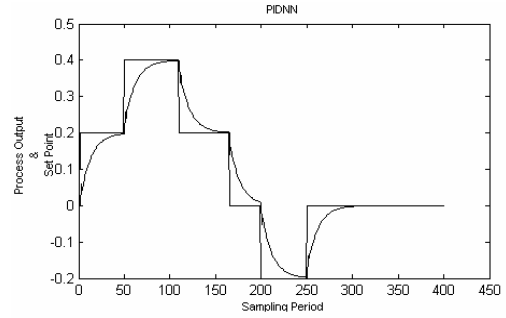


(ب)

نمودار (۴) کنترل کننده PIDNN روی فرآیند II (الف) خروجی فرآیند (ب) خروجی کنترل کننده



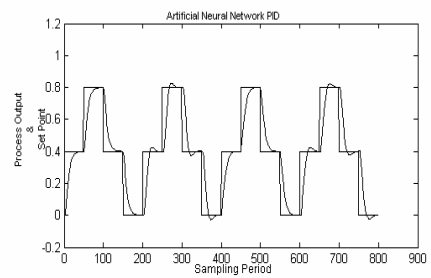
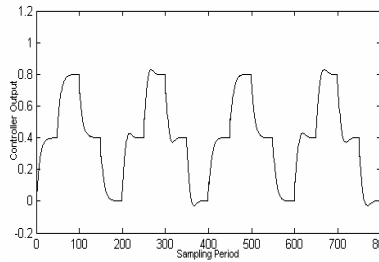
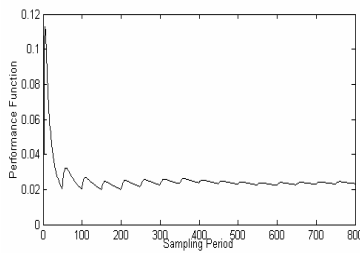
(الف)



(ب)

(الف)

نمودار (۵) کنترل کننده PIDNN روی فرآیند III (الف) خروجی فرآیند (ب) خروجی کنترل کننده



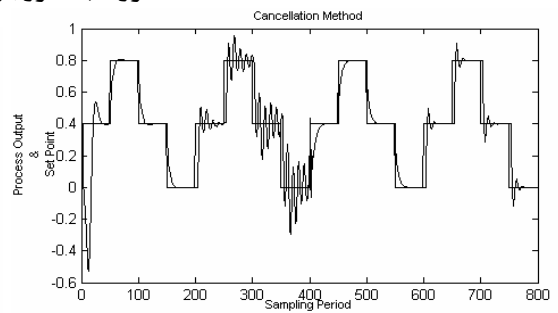
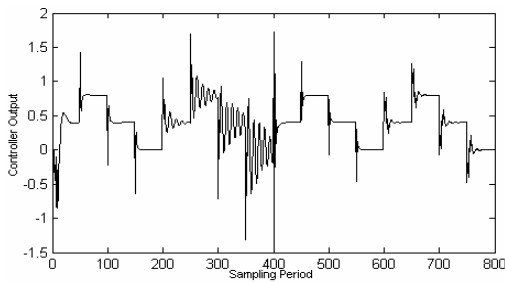
(ج)

(ب)

(الف)

نمودار (۶) عملکرد کنترل کننده PIDNN در هنگام تغییر مدل فرآیند (الف) خروجی فرآیند و مقدار

مقرر (ب) خروجی کنترل کننده (ج) تابع عملکرد

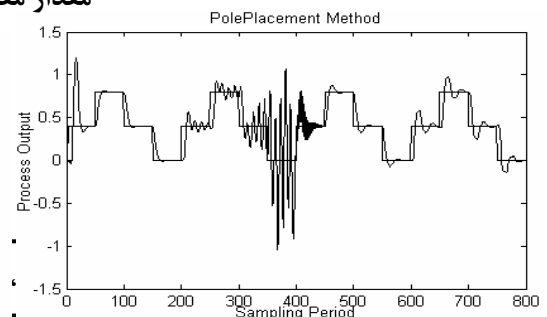
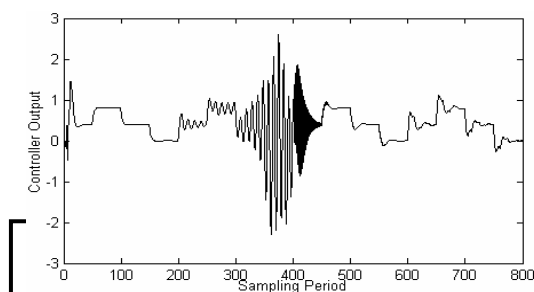


(ب)

(الف)

نمودار (۷) عملکرد کنترل کننده حذف قطبها در هنگام تغییر مدل فرآیند (الف) خروجی فرآیند و

مقدار مقرر (ب) خروجی کنترل کننده





(ب)

(الف)

نمودار (۸) عملکرد کنترل کننده جایگزینی قطبها در هنگام تغییر مدل فرآیند (الف) خروجی فرآیند و مقدار مقرر (ب) خروجی کنترل کننده

واژه نامه

$y(k)$ خروجی فرآیند در پریود k	$u_i(k)$ ورودی به نرون i از لایه ورودی در پریود k
$u(k)$ ورودی فرآیند در پریود k	$u'_j(k)$ ورودی به نرون j از لایه مخفی در پریود k
d تاخیر زمانی	$u''(k)$ ورودی نرون لایه خروجی در پریود k
q^{-1} عملگر شیفت کننده رو به عقب	J تابع عملکرد شبکه عصبی مصنوعی
S متغییر تبدیل لاپلاس	w_{ij} وزن از نرون i و به نرون j
$v(k)$ نویز در پریود k	$r(k)$ مقدار مقرر در پریود k

منابع:

- [1] Shahrokhi M. and M. A. Fanaei, "Comparison of Four Adaptive PID Controllers", *Scientia Iranica*, 7, 129-136 (2000)
- [2] Astrom K. J. and T. Hagglund, "Revisiting the Ziegler-Nichols Step Response Method for PID Control", *Journal of Process Control*, 14, 635-650 (2004)
- [3] Desborough L. and R. Miller, "Increase Customer Value of Industrial Control Performance Monitoring-Honeywell's Experience", *AIChE*, Symposium Series Number 328, Vol. 98 (2002)
- [4] Toscano R., "A Simple Robust PI/PID Controller Design Via Numerical Optimization Approach", *Journal of Process Control*, 15, 81-88 (2005)
- [5] Junghui and Huang, "Applying Neural Network to On-Line Updated PID Controllers for Non-Linear Process Control", *Journal of Process Control*, 14, 211-230 (2004)
- [6] Andrasik A., A. Meszaros and S. F. de Azevedo, "On-Line Tuning of Neural PID Controller Based on Plant Hybrid Modelling", *Computer and Chemical Engineering*, 28, 1499-1509 (2004)
- [7] Ng C.W. and M. A. Hussain, "Hybrid Neural Network- Prior Knowledge Model in temperature Control of a Semi-Batch Polymerization Process", *Chemical Engineering and Processing*, 43, 559-570 (2004)
- [8] Stephanopoulos G., "Chemical Process Control, An introduction to theory and practice", *Prentice-Hall*, (1984)
- [9] Huailin Shu and Youguo Pi, "PID Neural Networks for Time-Delay Systems", *Computer and Chemical Engineering*, 24, 859-862 (2000)
- [10] Denal M., et. al., "Self-Tuning PID Control of Atracurium-Induced Muscle Relaxation in Surgical Patients", *IEE Proc. D.*, 137, 261-272 (1990)



- [11]Tjorkro S. and S. L. Shah, “Adaptive PID Control”, *Proc. Amer. Cont. conf.*, 3, 1525-1529 (1985)
- [12]Fortescue T.R., et. al., “Implementation of Self-Tuning Regulators with Variable Forgetting Factors”, *Automatica*, 17, 831 (1981)
- [13]Hagan M.H. and M.B. Menhaj, “Training Feedforward Networks with the Marquardt Alhorithm”, *IEEE Transaction on Neural Network*, 5, No. 6 (1994)
- [۱۴] دکتر محمد باقر منهاج، ”مبانی شبکه های عصبی“ مرکز نشر دانشگاه صنعتی/امیر کبیر، جلد اول
- [15]Clarke D. W., et. al., “Generalized Predictive Control-Part1. The Basic Algorithm”, *Automatica*, 23, 137-148 (1987)