

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و ریاتیک

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی و تنظیم کنترل کننده PID فازی با الگوریتم‌های تکاملی برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه

سیده فائزه حسینی نوربین

استاد راهنما:

دکتر علیرضا الفی

بهمن ماه ۱۳۹۴

تقدیم به خانواده مهربانم،

کسانی که امید بخش ناامیدی‌ها و روشنایی بخش مسیر زندگی‌همستند و برای همراهیم از هیچ فداکاری و کوششی دریغ ننمودند. بدون حضور گرمشان هرگز طی نمودن مسیر موفقیت برایم میسر نبود. به ناچار از واژه کوچک سپاس برای قدردانی از آنها استفاده می‌کنم زیرا هیچ واژه‌ای را برای سپاسگزاری از ایشان نمیابم.

تشکر و قدردانی

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. نهایت سپاس و احترام خود را به جناب آقای دکتر الفی ارزانی می‌دارم چراکه پیشبرد این اثر از آغاز تا سرانجام، بدون راهنمایی‌ها و حمایت بی‌پایانشان میسر نبود. درایت ایشان در کمک به من برای گرفتن تصمیمات بحرانی زمانی که تحقیق بر سر دوراهی میماند، همواره برایم مثال زدنی و سرلوحه راهم بوده است. همچنین بخاطر فراهم آوردن محیطی برای بیان ایده‌های نو و نقد سازنده از ایشان سپاسگزارم.

تعهدنامه

اینجانب سیده فائزه حسینی نوربین دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و تنظیم کنترل کننده PID فازی با الگوریتم‌های تکاملی برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه تحت راهنمایی آقای دکتر علیرضا الفی متعهد میشوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پایان نامه به طراحی و تنظیم کنترل کننده PID فازی با الگوریتم‌های تکاملی برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه پرداخته می‌شود. ابتدا بدون در نظر گرفتن تاخیر شبکه با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، کنترل کننده PID معمولی و کنترل کننده PID فازی برای این سیستم‌ها طراحی شده و سپس در حضور تاخیر تصادفی متفاوت در هر دو کانال رفت و برگشت شبکه کنترل کننده‌ها طراحی خواهند شد. پس از آن، با توجه به عملکرد مطلوب کنترل کننده PID فازی نسبت به کنترل کننده PID معمولی در حذف اغتشاش بار و انحراف کمتر از نقطه تنظیم و نیز کاهش اثر تاخیر تصادفی شبکه، با بهینه‌سازی توابع عضویت آن، نتایج بسیار مطلوب و قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با حالت قبل محقق می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های کنترل تحت شبکه، کنترل کننده PID، منطق فازی، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های تکاملی.

مقالات استخراج شده از پایان نامه

- S. F. H. Noorbin, A. ALfi, "PID type fuzzy logic controller optimization for networked control systems using meta-heuristic algorithms," in *The Second International Conference on Electrical, Mechanical, Computer and Mechatronics Engineering (ICE)*, 2015. (Oral presentation)

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- تاریخچه
۵	۲-۱- تعریف سیستم کنترل تحت شبکه
۸	۳-۱- تاخیر ناشی از شبکه در سیستم‌های کنترل تحت شبکه
۸	۱-۳-۱- شبکه با دسترسی زمان‌بندی شده
۹	۲-۳-۱- شبکه با دسترسی تصادفی
۱۲	۴-۱- انتقال تکی بسته‌ها در مقابل انتقال چندگانه بسته‌ها در شبکه
۱۳	۵-۱- اتلاف بسته‌ها در شبکه
۱۳	۶-۱- پیکربندی سیستم‌های کنترل تحت شبکه
۱۳	۱-۶-۱- ساختار سلسله‌ای
۱۴	۲-۶-۱- ساختار مستقیم
۱۵	۷-۱- کاربرد

۱۹	فصل ۲: تاخیر در سیستم‌های کنترل تحت شبکه و راهبردهای پیشین
۲۰	۱-۲- مقدمه
۲۰	۲-۲- تاخیر در حلقه
۲۲	۳-۲- اثرات تاخیر در حلقه
۲۲	۱-۳-۲- کاهش عملکرد
۲۲	۲-۳-۲- ناپایداری
۲۳	۴-۲- راهبردهای پیشین
۲۴	۱-۴-۲- رویکرد مدل زمان گسسته قطعی تعمیم یافته
۲۵	۲-۴-۲- رویکرد صف‌بندی
۲۵	۳-۴-۲- رویکرد کنترل اتفاقی بهینه
۲۶	۴-۴-۲- رویکرد آشفتگی
۲۶	۵-۴-۲- رویکرد زمان‌بندی زمان نمونه‌برداری
۲۷	۶-۴-۲- رویکرد بر اساس رویداد
۲۷	۷-۴-۲- رویکرد تطبیق کنترل کاربر نهایی
۲۸	۸-۴-۲- رویکرد کنترل مقاوم
۲۸	۹-۴-۲- رویکرد مدولاسیون منطق فازی

۳۷	فصل ۳: بهینه‌سازی
۳۸	۱-۳- مقدمه
۳۹	۲-۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی
۳۹	۱-۲-۳- پیش زمینه
۴۳	۲-۲-۳- روش نیوتن
۴۴	۳-۲-۳- بهینه‌سازی نامقید
۴۵	۴-۲-۳- بهینه‌سازی مقید
۴۸	۵-۲-۳- روش‌های بدون گرادیان
۵۰	۳-۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری
۵۲	۱-۳-۳- الگوریتم گروه جستجو

۵۵	فصل ۴: ساختار کنترل و شبیه‌سازی
----	---------------------------------

۵۶	۱-۴- مقدمه
۵۶	۲-۴- کنترل کننده PID فازی
۶۲	۳-۴- شبیه سازی
۶۳	۲-۳-۴- نتایج شبیه سازی بدون تاخیر
۶۶	۳-۳-۴- نتایج شبیه سازی در حضور تاخیر تصادفی شبکه
۷۵	۴-۳-۴- نتایج بهینه سازی توابع عضویت در کنترل کننده PID فازی بدون تاخیر
۸۲	۵-۳-۴- نتایج بهینه سازی توابع عضویت در کنترل کننده PID فازی در حضور تاخیر تصادفی شبکه
۸۹	۴-۴- پایداری

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادها

۹۱	۱-۵- نتیجه گیری
۹۲	۲-۵- پیشنهادها

۹۵	مراجع
----	-------

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) ساختار کلی سیستم کنترل دیجیتال مستقیم ۳
- شکل (۲-۱) ساختار کلی سیستم کنترل توزیع شده ۴
- شکل (۳-۱) ساختار کلی سیستم کنترل تحت شبکه ۵
- شکل (۴-۱) ساختار معمولی یک سیستم کنترل تحت شبکه و جریان‌های اطلاعات ۷
- شکل (۵-۱) دیاگرام زمانی برای دو گره در شبکه با دسترسی تصادفی ۱۱
- شکل (۶-۱) دیاگرام زمانی برای یک گره دلخواه در شبکه زمان‌بندی شده ۱۱
- شکل (۷-۱) سیستم کنترل تحت شبکه با ساختار سلسله‌ای ۱۵
- شکل (۸-۱) سیستم کنترل تحت شبکه با ساختار مستقیم ۱۵
- شکل (۱-۳) بهینه‌سازی بر اساس گرادیان [۶۱] ۴۲
- شکل (۲-۳) تابع چند کیفیتی یک بعدی ۵۱
- شکل (۱-۴) سیستم کنترل PID فازی ۵۸
- شکل (۲-۴) کنترل‌کننده منطق فازی ۵۸
- شکل (۳-۴) توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی کنترل‌کننده منطق فازی ۶۱
- شکل (۴-۴) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر شبکه ۶۴
- شکل (۵-۴) سیگنال کنترل برای دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر شبکه ۶۵
- شکل (۶-۴) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر شبکه ۶۵
- شکل (۷-۴) سیگنال کنترل برای دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر شبکه ۶۶
- شکل (۸-۴) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID ۶۷
- شکل (۹-۴) سیگنال کنترل برای دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID ۶۷
- شکل (۱۰-۴) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID فازی ۶۸
- شکل (۱۱-۴) سیگنال کنترل برای دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID فازی ۶۸
- شکل (۱۲-۴) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID ۶۹
- شکل (۱۳-۴) سیگنال کنترل برای دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID ۶۹

- شکل (۴-۱۴) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID فازی ۷۰
- شکل (۴-۱۵) سیگنال کنترل برای دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID فازی ۷۰
- شکل (۴-۱۶) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه ... ۷۲
- شکل (۴-۱۷) سیگنال کنترل برای دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه ۷۲
- شکل (۴-۱۸) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه ... ۷۳
- شکل (۴-۱۹) سیگنال کنترل برای دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه ۷۳
- شکل (۴-۲۰) مراکز توابع عضویت ورودی اول کنترل کننده فازی ۷۴
- شکل (۴-۲۱) توابع عضویت بهینه نامتقارن کنترل کننده فازی برای P_1 بدون تاخیر ۷۷
- شکل (۴-۲۲) توابع عضویت بهینه نامتقارن کنترل کننده فازی برای P_2 بدون تاخیر ۷۷
- شکل (۴-۲۳) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه ۷۸
- شکل (۴-۲۴) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه برای P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر ۷۸
- شکل (۴-۲۵) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه ۷۹
- شکل (۴-۲۶) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه برای P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر ۷۹
- شکل (۴-۲۷) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد ۸۰
- شکل (۴-۲۸) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد برای P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر ۸۰
- شکل (۴-۲۹) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد ۸۱
- شکل (۴-۳۰) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد برای P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر ۸۱
- شکل (۴-۳۱) توابع عضویت بهینه کنترل کننده فازی برای P_1 در حضور تاخیر تصادفی شبکه ۸۴
- شکل (۴-۳۲) توابع عضویت بهینه کنترل کننده فازی برای P_2 در حضور تاخیر تصادفی شبکه ۸۴
- شکل (۴-۳۳) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه ۸۵

- شکل (۴-۳۴) خروجی کنترل‌کننده فازی با توابع عضویت بهینه برای P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه ۸۵
- شکل (۴-۳۵) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه برای کنترل‌کننده فازی با توابع عضویت بهینه ۸۶
- شکل (۴-۳۶) خروجی کنترل‌کننده فازی با توابع عضویت بهینه برای P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه ۸۶
- شکل (۴-۳۷) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه برای کنترل‌کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد ۸۷
- شکل (۴-۳۸) خروجی کنترل‌کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد برای P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه ۸۷
- شکل (۴-۳۹) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه برای کنترل‌کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد ۸۸
- شکل (۴-۴۰) خروجی کنترل‌کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد برای P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه ۸۸

فهرست جداول

- جدول (۱-۴) پایگاه قواعد برای ورودی‌ها و خروجی کنترل‌کننده منطق فازی ۶۱
- جدول (۲-۴) نتایج بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID معمولی بدون تاخیر ۶۴
- جدول (۳-۴) نتایج بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID فازی استاندارد بدون تاخیر ۶۴
- جدول (۴-۴) نتایج بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID معمولی در حضور تاخیر تصادفی شبکه ۷۱
- جدول (۵-۴) نتایج بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID فازی استاندارد در حضور تاخیر تصادفی شبکه... ۷۱
- جدول (۶-۴) نتایج بهینه‌سازی توابع عضویت کنترل‌کننده PID فازی بدون تاخیر در مقایسه با توابع عضویت استاندارد ۷۶
- جدول (۷-۴) نتایج بهینه‌سازی توابع عضویت کنترل‌کننده PID فازی در حضور تاخیر تصادفی شبکه در مقایسه با توابع عضویت استاندارد ۸۳

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- تاریخچه

توسعه و تحقیق در زمینه شبکه‌های به اشتراک گذاری داده تاریخچه‌ای طولانی دارد. پروتکل‌های مدرن شبکه مانند اترنت و اینترنت که بطور گسترده‌ای برای مصارف عمومی استفاده می‌شوند، صورت تکامل یافته شبکه‌های داده ابتدایی مانند اسلاتد آلوها^۱ و آرپانت^۲ می‌باشند که حدوداً ۳۰-۴۰ سال پیش ایجاد شده‌اند [۱].

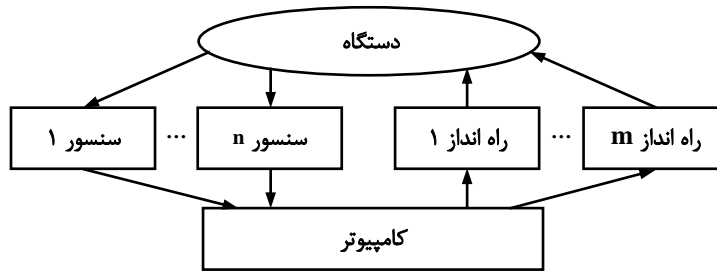
سیستم‌های کنترل مبتنی بر کامپیوتر در دهه ۱۹۵۰ پدیدار شد. در مرحله نخست، پتانسیل استفاده از کامپیوترهای دیجیتال بعنوان اجزای سیستم کنترل، محدود بود زیرا کامپیوترها در آن زمان بسیار بزرگ بوده، توان مصرفی زیادی داشتند و قابلیت اطمینان آنها نیز پایین بود. پیاده سازی اولیه کامپیوترها در سیستم‌های کنترل در حالت نظارتی بعنوان راهنمای کاربر و یا کنترل نقطه تنظیم اجرا شد که در هر دو حالت تجهیزات معمولی کنترل آنالوگ مورد نیاز بودند.

این وضعیت با ظهور سیستم کنترل دیجیتال مستقیم^۳ تغییر کرد. در این سیستم‌ها کامپیوتر، مستقیماً فرآیند را کنترل می‌نماید. شکل (۱-۱) ساختار کلی یک سیستم DDC را نشان می‌دهد. در سیستم‌های DDC تجهیزات کنترل آنالوگ فرآیند، همگی با یک کامپیوتر جایگزین شدند. سنسورها با خروجی آنالوگ و عملگرها با ورودی آنالوگ دارای اتصال‌های نقطه به نقطه با کامپیوتر دیجیتال بودند. وظایف سنسور و عملگر و محاسبات سیگنال کنترل همگی توسط خود کامپیوتر اجرا می‌شد. با افزایش مقیاس سیستم کنترل و توسعه سریع تکنولوژی کامپیوتر، نیاز به توزیع قدرت محاسبات پدیدار و سپس ممکن گشت.

¹ Slotted ALOHA

² ARPANET

³ Direct Digital control (DDC)



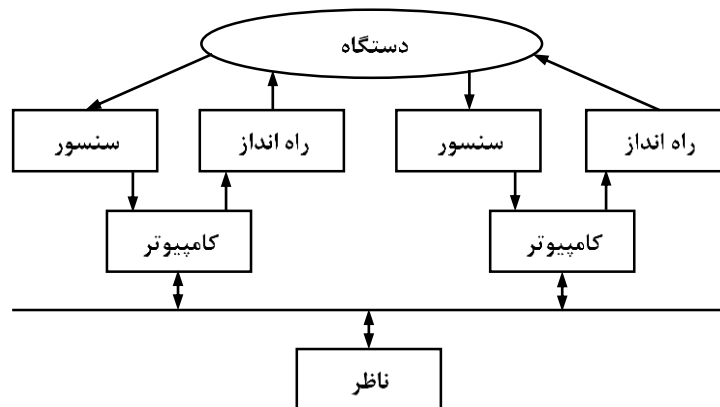
شکل (۱-۱) ساختار کلی سیستم کنترل دیجیتال مستقیم

سپس سیستم کنترل توزیع شده^۱ بوجود آمد که ساختار آن در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. اولین DCS موجود در سال ۱۹۷۵، TDC 2000 از آن هانیول^۲ بود [۲]. در یک DCS چندین کامپیوتر در تعامل که به شبکه سریال متصل هستند، همگی حجم کار یکسانی را به اشتراک می‌گذارند. این سیستم عموماً شامل ایستگاه‌های فرآیند (که در آن فرآیند کنترل می‌شود)، ایستگاه‌های کاربر (که در آن فرآیند توسط کاربرها نظارت می‌شود) و ایستگاه‌های کمکی مختلف (برای آماده‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند) می‌باشد. با این حال، ماژول‌های کنترل در یک DCS به ندرت به هم متصل هستند زیرا بیشتر وظایف کنترلی بلادرنگ (وظیفه سنسور، عملگر و محاسبات) در ایستگاه‌های فرآیند جداگانه انجام می‌شوند. تنها سیگنال‌های روشن و خاموش، اطلاعات نظارت، اطلاعات هشدار دهنده و مشابه اینها در شبکه سریال ارسال می‌گردند [۳].

به علت مزایای قابل توجه شبکه‌های انتقال داده، بسیاری از شرکت‌ها و موسسات صنعتی به استفاده از شبکه برای اهداف کنترل از راه دور صنعتی و اتوماسیون کارخانه علاقه نشان دادند. در نتیجه تحقیق و توسعه گسترده، پروتکل‌های شبکه متعددی برای کنترل صنعتی ایجاد شد.

¹ Distributed Control System (DCS)

² Honeywell



شکل (۲-۱) ساختار کلی سیستم کنترل توزیع شده

بعنوان مثال، شرکت آلمانی رابرت بوش در سال ۱۹۸۳ شبکه محلی کنترل کننده^۱ را برای استفاده در صنایع خودرو بکار برد، که هم اکنون در بسیاری از کنترل کننده های صنعتی کاربرد دارد. مثال دیگر موجود در زمینه شبکه های صنعتی، طراحی و توسعه پروفیباس^۲ توسط شش شرکت و پنج موسسه آلمانی در سال ۱۹۸۷ می باشد. همچنین بسیاری از پروتکل های صنعتی شبکه از جمله فاندیشن فیلدباس^۳ و دیوایس نت^۴ نیز در این دوره ایجاد شدند که بسیاری از این پروتکل ها، مقاوم بوده و دارای قابلیت اطمینان بالا برای اهداف کنترلی بلادرنگ هستند [۱].

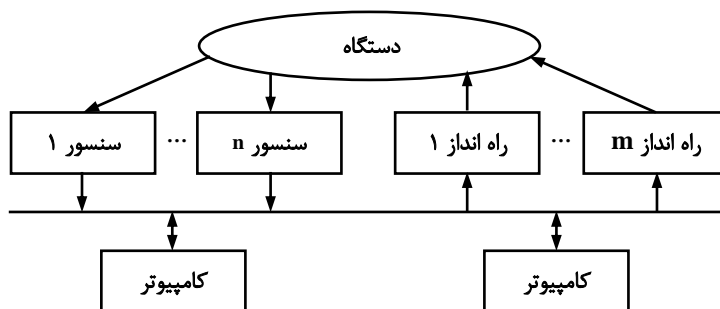
در دهه ۱۹۹۰، توسعه میکروپروسورها تاثیر عمیقی ایجاد کرد چنانکه سبب شد کامپیوترها در کنترل تمام دستگاه های تولید بکار روند. به علاوه، به کمک طراحی چیپ ASIC و کاهش چشمگیر قیمت سیلیکون، سنسورها و عملگرها به واسط شبکه مجهز شده اند و در نتیجه می توانند به گره های مستقل در شبکه کنترل بلادرنگ تبدیل شوند.

¹ Controller Area Network (CAN)

² Profibus

³ Foundation Fieldbus

⁴ DeviceNet



شکل (۳-۱) ساختار کلی سیستم کنترل تحت شبکه

این امر موجب پیدایش سیستم‌های کنترل تحت شبکه^۱ شد. شکل (۳-۱) یک سیستم کنترل تحت شبکه را نشان می‌دهد [۳]. در همین حال، تکنولوژی در حوزه شبکه‌های عمومی کامپیوتر به ویژه اترنت^۲، نیز به سرعت پیشرفت کرد. با کاهش هزینه، افزایش سرعت، گسترش کاربرد، بیشماری نرم‌افزارها و برنامه‌ها و نیز زیرساخت خوب، این شبکه‌ها به رقیب اصلی شبکه‌های صنعتی در کاربردهای کنترل تبدیل شدند.

به علاوه، شهرت اینترنت^۳ سبب ورود این شبکه‌ها به سازمان‌های مختلفی گشت. بنابراین، با استفاده از این شبکه‌ها در کاربردهای کنترل امکان اتصال به اینترنت جهت اجرای کنترل از راه دور در فاصله‌های بسیار دورتر نسبت به گذشته، بدون سرمایه گذاری روی کل زیرساخت فراهم شد. اگرچه شبکه‌های صنعتی برای اتصال اینترنت توسعه یافتند اما همچنان شبکه‌های عمومی در کاربردهای کنترل به علت قیمت کمتر و کاربرد گسترده‌تر مورد توجه بودند [۱].

۱-۲- تعریف سیستم کنترل تحت شبکه

سیستم‌های کنترل بازخوردی را که در آن حلقه‌های کنترل توسط یک شبکه بلادرنگ بسته شده باشند، سیستم‌های کنترل تحت شبکه می‌نامند. ویژگی معرف این سیستم آن است که اطلاعات

¹ Networked Control Systems (NCSs)

² Ethernet

³ Internet

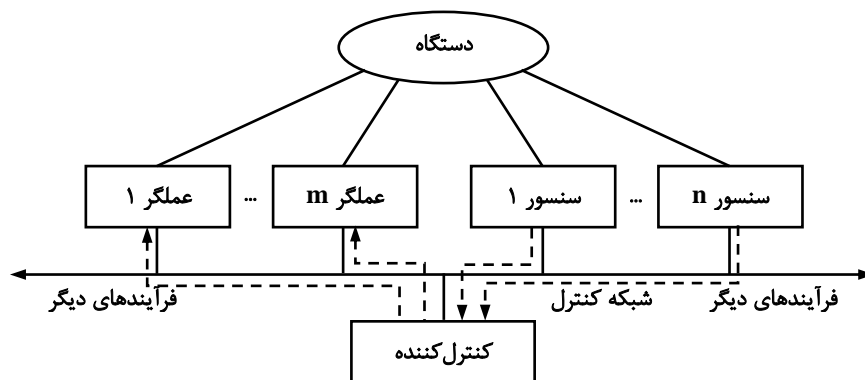
(ورودی مرجع، خروجی دستگاه، سیگنال کنترل، غیره) با استفاده از یک شبکه میان اجزای سیستم کنترل (سنسورها، کنترل کننده، عملگرها، غیره) انتقال می‌یابند. شکل (۱-۴) جریان‌های اطلاعات را در یک ساختار معمولی از سیستم کنترل تحت شبکه نمایش می‌دهد.

در سیستم‌های کنترل تحت شبکه داده بلادرنگ سنسوری و کنترلی در شبکه انتقال می‌یابند و گره‌های شبکه جهت انجام وظایف کنترل همکاری نزدیکی با یکدیگر دارند. از جمله شبکه‌های کنونی کاندید برای پیاده‌سازی سیستم‌های کنترل تحت شبکه می‌توان دیوایس نت و اترنت و فایروایر^۱ را نام برد. هر شبکه دارای پروتکل‌هایی است که برای کاربردهای محدود و خاصی طراحی شده‌اند. همچنین رفتار یک سیستم کنترل تحت شبکه بستگی زیادی به پارامترهای عملکرد شبکه زیربنا دارد که شامل نرخ انتقال، پروتکل دسترسی رسانه، طول بسته و ... می‌باشد [۴].

تکنولوژی‌های شبکه‌ای نمودن داده مزایای بسیاری برای لینک کردن نقاط داده مانند کامپیوترها دارد [۱]. شبکه‌ها ارتباط بین فضای مجازی و فیزیکی، اجرای کارها از راه دور، تبادل داده‌ها میان کاربران، سهولت در تعمیر و نگهداری هر کانال ارتباطی منحصر به فرد برای هر پارامتر کنترلی و عیب‌یابی سیستم و همچنین حذف سیم‌کشی‌های غیر ضروری پیچیده، وزن کم، کاهش هزینه‌ها و الزامات تامین برق، افزایش سرعت و انعطاف پذیری پیکر بندی و ساختار سیستم را فراهم می‌کنند [۵].

استفاده از شبکه مخابراتی در حلقه کنترل بازخورد سبب پیچیده شدن تجزیه و تحلیل و طراحی سیستم کنترل تحت شبکه می‌شود. روش‌های کنترلی رایج، فرضیه‌های ایده‌آل بسیاری دارد مانند کنترل سنکرون، عملکرد بدون تاخیر سنسورها و عملگرها. بنابراین قبل از اعمال این روش‌ها به سیستم‌های تحت شبکه می‌بایست مورد بازبینی قرار گیرند؛ به خصوص مسائل زیر باید بررسی شوند.

¹ FireWire



شکل (۴-۱) ساختار معمولی یک سیستم کنترل تحت شبکه و جریان‌های اطلاعات

اولین مسئله تاخیر شبکه (تأخیر سنسور به کنترل کننده و تأخیر کنترل کننده به عملگر) می‌باشد که هنگام انتقال داده میان دستگاه‌های متصل به رسانه مشترک رخ می‌دهد. این تأخیر می‌تواند ثابت و یا متغیر با زمان باشد که در هر صورت باعث کاهش عملکرد سیستم‌های کنترلی خواهد شد که بدون در نظر گرفتن تأخیر طراحی شده‌اند و حتی ممکن است سیستم را ناپایدار نماید.

مشکل بعدی آن است که می‌توان به شبکه بصورت مجموعه‌ای از مسیرهای غیرقابل اطمینان به هم تنیده شده نگاه کرد. برخی از بسته‌ها علاوه بر مواجهه با تأخیر شبکه، ممکن است در طول انتقال گم شوند. بنابراین تأثیر اتلاف بسته‌ها بر عملکرد یک سیستم کنترل تحت شبکه، مسئله‌ای است که باید در نظر گرفته شود.

مشکل دیگر آن است که با توجه به پهنای باند و محدودیت سائز بسته در شبکه ممکن است خروجی دستگاه در بسته‌های چندگانه انتقال یابد (که انتقال چندگانه نامیده می‌شود). به علت قرارداد رسانه شبکه با گره‌های دیگر موجود در شبکه ممکن است همه یا بخشی از بسته‌ها و گاهی هیچکدام از آن‌ها به زمان انجام محاسبات در کنترل کننده نرسیده و یا ممکن است همزمان با یکدیگر نرسند [۳].

زمان بندی شبکه در طراحی یک NCS نیز مسئله دیگری است زیرا مجموعه‌ای از دستگاه‌ها به شبکه متصل هستند. در این حالت، انتقال‌های همزمان رخ می‌دهد که باعث به تأخیر افتادن برخی از داده‌های بلادرنگ و حتی از دست رفتن زمان در نظر گرفته شده برای انتقال آن‌ها خواهد شد. الگوریتم‌های زمان بندی کنترل، برای کاهش عملکرد از دست رفته چنین سیستمی تلاش خواهند

کرد

[۴].

مسئله‌های پایه ای که در سیستم کنترل تحت شبکه مورد توجه قرار می‌گیرند عبارتند از: تاخیر ناشی از شبکه، انتقال ورودی‌ها و خروجی‌ها بصورت چندگانه و تکی و همچنین گم شدن بسته‌ها در شبکه. در اینجا به شرح مختصری از مشکلات موجود در این سیستم‌ها می‌پردازیم.

۱-۳- تاخیر ناشی از شبکه در سیستم‌های کنترل تحت شبکه

تأخیر شبکه در سیستم‌های کنترل تحت شبکه به علت تبادل داده توسط سنسورها، عملگرها و کنترل‌کننده‌ها از طریق شبکه رخ می‌دهد. این تأخیر در سیستم‌های کنترلی که بدون در نظر گرفتن آن طراحی شده‌اند سبب کاهش عملکرد و حتی ناپایداری سیستم خواهد شد. بسته به پروتکل کنترل دسترسی رسانه^۱ شبکه کنترل، تأخیر شبکه ممکن است ثابت، متغیر با زمان و حتی تصادفی باشد. پروتکل‌های MAC بطور کلی در دو دسته طبقه بندی می‌شوند: دسترسی تصادفی و دسترسی زمان بندی شده [۶].

ویژگی‌های تأخیر در سیستم‌های کنترل تحت شبکه به نوع شبکه استفاده شده بستگی دارد، که به شرح زیر می‌باشد.

۱-۳-۱- شبکه با دسترسی زمان بندی شده

در پروتکل‌های شبکه محلی با دسترسی زمان بندی شده (سرویس چرخشی) مانند IEEE 802.4، توکن باس SAE، پروفیباس، IEEE 802.5، حلقه رمز^۲ SAE، MILSTD1553B و FIP، سیگنال‌های کنترل و سنسور بصورت چرخشی با رفتارهای قطعی منتقل می‌شوند. بنابراین، تأخیرها متناوب بوده و

¹ Medium Access Control (MAC)

² Token Ring

به سادگی می‌توان با یک تابع متناوب آن را مدلسازی نمود؛ به نحوی که $\tau_k^{sc} = \tau_{k+1}^{sc}$ و $\tau_k^{ca} = \tau_{k+1}^{ca}$ ، که در آن τ_k^{ca} و τ_k^{sc} بترتیب تاخیر سنسور به کنترل‌کننده و تاخیر کنترل‌کننده به عملگر در زمان نمونه‌برداری k می‌باشند. در حالت ایده‌آل مدل‌ها به نحو عالی کار می‌کنند. در عمل ممکن است سیستم کنترل تحت شبکه به دلایل گوناگونی تغییرات کوچکی را در تاخیرهای متناوب تجربه کند. برای مثال، اختلاف مولدهای کلاک در کنترل‌کننده و سیستم راه دور، ممکن است سبب تغییرات تاخیر شود [۱].

۱-۳-۲- شبکه با دسترسی تصادفی

شبکه‌های محلی با دسترسی تصادفی مانند CAN و اترنت، تاخیرهای نامعین بیشتری دارد. تاخیرهای زمان انتظار ناشی از در صف ماندن و برخورد قالب‌ها، بخش‌های مشخص تاخیرهای تصادفی شبکه می‌باشند. زمانی که یک سیستم کنترل در طول شبکه کار می‌کند، فاکتورهای بسیاری مانند تاخیرهای زمان انتظار صف در سوئیچ و یا مسیریاب و همچنین تاخیرهای زمان انتشار از مسیرهای مختلف شبکه، سبب افزایش تصادفی بودن تاخیرهای شبکه می‌گردند. به علاوه، شبکه با سرویس چرخشی که به شبکه با دسترسی تصادفی متصل باشد نیز تاخیرهای تصادفی ایجاد می‌کند [۱].

دسترسی چندگانه نوع حس حامل^۱ اغلب در شبکه‌های دسترسی تصادفی استفاده می‌شود، در حالیکه عبور رمزی^۲ و دسترسی چندگانه نوع تقسیم زمان^۳ معمولاً در شبکه‌های زمان‌بندی شده بکار می‌روند. شبکه‌های کنترل که از CSMA استفاده می‌کنند شامل دیوایس نت و اترنت می‌باشند.

شکل (۱-۵) موقعیت‌های مختلف ممکن این نوع شبکه را نمایش می‌دهد. تصویر، دو گره را نشان می‌دهد که بطور مستمر (با توجه به یک خط زمانی ثابت) پیام‌ها را انتقال می‌دهند.

¹ Carrier Sense Multiple Access (CSMA)

² Token Passing (TP)

³ Dime Division Multiple Access (TDMA)

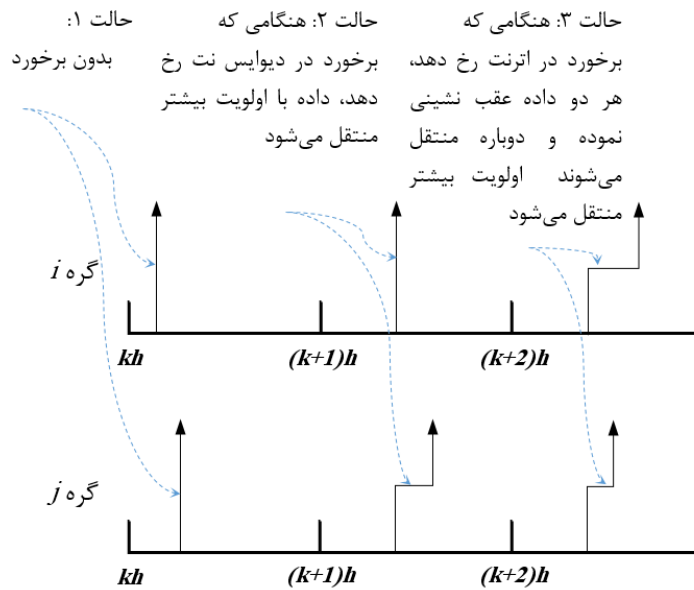
یک گره در یک شبکه CSMA قبل از هر انتقال شبکه را بررسی می‌کند. زمانی که شبکه در حالت غیر فعال قرار دارد، گره فوراً انتقال را آغاز می‌کند. همانطور که در حالت ۱ شکل (۵-۱) نشان داده شده است. در غیر این صورت، تا زمانی که شبکه مشغول نباشد صبر می‌کند.

زمانی که دو یا تعدادی گره همزمان جهت اقدام به انتقال تلاش می‌کنند، برخورد رخ می‌دهد. روش حل مسئله متناظر به پروتکل بستگی دارد. دیوایس نت خود یک CAN است، از CSMA با قرارداد بیت پرداز^۱ استفاده می‌کند. از آنجا که پیام‌ها در CAN اولویت بندی شده می‌باشند، پیام‌ها با اولویت بیشتر هنگام برخورد، بدون هیچ وقفه‌ای انتقال می‌یابد و انتقال پیام با کمترین اولویت به زمانی که شبکه غیر فعال است موکول خواهد گردید، همانطور که در حالت ۲ شکل (۵-۱) نمایش داده شده است.

اترنت پروتکل CSMA را با پروتکل تشخیص برخورد بکار می‌برد. زمانی که برخورد رخ می‌دهد، تمام گره‌هایی که دچار این برخورد شده‌اند برای انتقال مجدد به اندازه یک زمان تصادفی (این مدت زمان معمولاً توسط الگوریتم باینری عقب‌نشینی تعیین می‌گردد) منتظر می‌مانند. همانطور که در حالت ۳ شکل (۵-۱) نشان داده شده است.

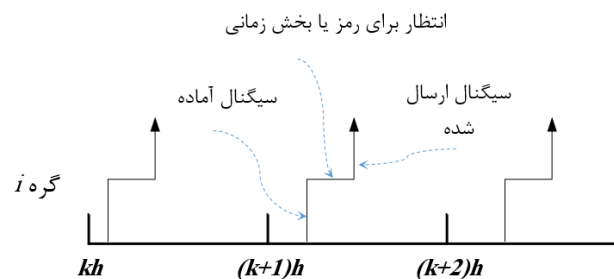
بسته‌ها در این نوع شبکه‌ها تحت تاثیر تاخیر تصادفی هستند و در بدترین حالت، زمان انتقال بسته‌ها نامحدود خواهد شد. بنابراین شبکه‌های CSMA بطور کلی غیرقطعی در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، اگر پیام‌های شبکه اولویت بندی شده باشند، اولویت‌های بالاتر شانس بیشتری برای انتقال به موقع خواهند داشت.

¹ CSMA with a Bitwise Arbitration (CSMA/BA)



شکل (۵-۱) دیاگرام زمانی برای دو گره در شبکه با دسترسی تصادفی

پروتکل TP در باس رمز (IEEE Standard 802.4)، حلقه رمز (IEEE Standard 802.5) و واسط فیبر داده توزیع شده با ساختارهای MAC دیده می‌شود، TDMA در فایروایر استفاده می‌شود. یک دیاگرام زمانی در شکل (۶-۱) برای این نوع شبکه نشان داده شده است. این پروتکل‌ها رقابت را در رسانه شبکه از بین می‌برند؛ آن‌ها با توجه به یک برنامه از پیش تعیین شده به هر گره موجود در شبکه اجازه می‌دهند تا انتقال انجام دهد.



شکل (۶-۱) دیاگرام زمانی برای یک گره دلخواه در شبکه زمان‌بندی شده

در شبکه‌های زمان‌بندی شده امکان ایجاد انتقال تناوبی پیام‌ها وجود دارد. بعنوان مثال فایروایر دارای چرخه انتقال (125 μ s) می‌باشد. این چرخه به بخش‌های زمانی کوچک تقسیم شده است که در آن به هر انتقال همزمان یک بخش زمانی برای انتقال در هر چرخه اختصاص داده شده است. تاخیرهای انتقال بسته در شبکه‌های زمان‌بندی شده هنگام انتظار برای رمز یا بخش زمانی رخ می‌دهند، که می‌توانند با بکارگیری انتقال تناوبی بسته‌ها هم محدود و هم ثابت باشند [۳].

۱-۴- انتقال تکی بسته‌ها در مقابل انتقال چندگانه بسته‌ها در شبکه

انتقال تکی بسته‌ها به این معنی است که داده سنسور یا عملگر کنار هم در یک بسته شبکه جمع شده و در یک زمان انتقال یابند، در حالیکه در انتقال چندگانه داده سنسور یا عملگر در بسته‌های مجزا انتقال می‌یابند و ممکن است این بسته‌ها بطور همزمان به کنترل‌کننده و یا دستگاه نرسند. یک دلیل برای انتقال چندگانه بسته‌ها آن است که شبکه‌های تعویض بسته^۱ با توجه به محدودیت اندازه بسته، فقط اطلاعات محدودی را در یک بسته حمل می‌کنند. بنابراین مقادیر بزرگ داده باید جهت انتقال در بسته‌های متعدد قرار داده شوند.

دلیل دیگر آن است که سنسورها و عملگرها در شبکه‌های محلی اغلب در محیط بزرگی توزیع شده‌اند و قرار دادن داده در یک بسته شبکه غیر ممکن است. سیستم‌های رایج نمونه‌برداری داده فرض می‌کنند خروجی‌های دستگاه و ورودی‌های کنترل در یک زمان دریافت شده‌اند که ممکن است برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه با انتقال چندگانه بسته‌ها صادق نباشد. با توجه به تاخیرهای دسترسی شبکه، ممکن است کنترل‌کننده در زمان محاسبات کنترل قادر به دریافت تمام خروجی‌های به روز رسانی شده دستگاه بطور همزمان نباشد.

شبکه‌های مختلفی برای انواع مختلف انتقال مناسب هستند. اترنت برای انتقال اطلاعات مانند پوشه‌های داده به گونه ای طراحی شده که می‌تواند حداکثر ۱۵۰۰ بایت داده را در یک بسته قرار

¹ Packet Switching

دهد. پس، بهتر است که تمام داده سنسور در یک بسته جمع شده و کنار هم انتقال یابد (انتقال تکی بسته‌ها). از طرف دیگر، دیوایس نت با ویژگی انتقال داده کنترل در اندازه کوچک، دارای فضای حداکثر ۸ بایت داده در هر بسته می‌باشد؛ از این رو در دیوایس نت داده سنسور غالباً باید وارد بسته‌های مختلف گردد.

۱-۵- اتلاف بسته‌ها در شبکه

گم شدن بسته‌ها در سیستم کنترل تحت شبکه، زمانی اتفاق می‌افتد که گره پاسخگو نبوده و یا پیام‌ها برخورد داشته باشند. اگرچه اکثر پروتکل‌های شبکه به مکانیزم تلاش مجدد انتقال مجهز هستند اما فقط برای زمان محدودی اقدام به ارسال مجدد می‌کنند و پس از گذشت این زمان بسته‌ها حذف خواهند شد. به علاوه، در داده کنترل بازخوردی بلادرنگ مانند اطلاعات سنسور و سیگنال‌های محاسبه شده کنترل، ممکن است حذف پیام قدیمی که منتقل نشده و انتقال بسته جدید (اگر در دسترس باشد)، مفید واقع شود. در این راه، کنترل‌کننده همواره داده جدید را برای محاسبات دریافت خواهد کرد.

معمولاً در دستگاه‌های تحت کنترل بازخوردی حذف میزان مشخصی از داده برای سیستم قابل تحمل می‌باشد اما بهتر است پایداری سیستم را هنگامی که انتقال بسته‌ها در نرخ مشخصی انجام می‌گیرد، تعیین کنیم و همچنین کران‌های پایین قابل قبولی را برای نرخ انتقال بسته‌ها محاسبه کنیم [۳].

۱-۶- پیکربندی سیستم‌های کنترل تحت شبکه

دو نوع کلی برای پیکربندی سیستم‌های کنترل تحت شبکه وجود دارد.

۱-۶-۱- ساختار سلسله‌ای

بنیاد این ساختار، همانطور که در شکل (۱-۷) نشان داده شده، از یک کنترل‌کننده اصلی و یک

سیستم حلقه بسته راه دور تشکیل شده است.

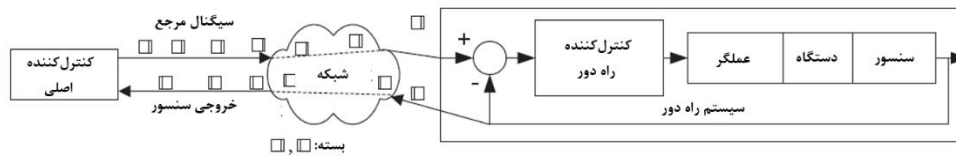
کنترل کننده اصلی بطور متناوب سیگنال مرجع را محاسبه و از طریق شبکه در یک قالب یا بسته به سیستم راه دور ارسال می نماید. سپس سیستم راه دور سیگنال مرجع را به منظور کنترل حلقه بسته محلی پردازش نموده و خروجی سنسور را برای کنترل حلقه بسته تحت شبکه به کنترل کننده اصلی بازمی گرداند.

از آنجائیکه کنترل کننده راه دور قبل از دریافت سیگنال مرجع جدید می بایست به پردازش سیگنال قبلی بپردازد، پس زمان نمونه برداری در حلقه کنترل تحت شبکه نسبت به حلقه کنترل محلی بیشتر است. همانند ساختار مستقیم، کنترل کننده اصلی جهت کنترل حلقه های چندگانه کنترل تحت شبکه برای چندین سیستم راه دور پیاده سازی شود.

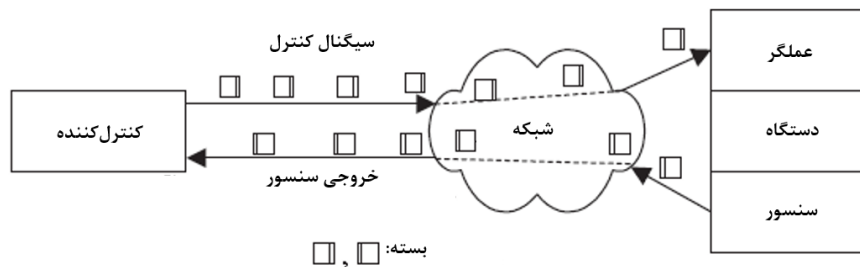
۱-۶-۲- ساختار مستقیم

سیستم های کنترل تحت شبکه با ساختار مستقیم از یک کنترل کننده و یک سیستم راه دور ساخته شده که شامل یک دستگاه، سنسورها و عملگرها می باشد. کنترل کننده و دستگاه بصورت فیزیکی در مکان های متفاوتی قرار دارند و همانطور که در شکل (۱-۸) نشان داده شده، به منظور ایجاد کنترل حلقه بسته راه دور توسط یک شبکه داده در ارتباطند. به عبارت دیگر، حلقه کنترل از طریق شبکه بسته می شود.

سیگنال کنترل در یک قالب یا بسته قرار گرفته و از طریق شبکه به دستگاه ارسال می شود. سپس دستگاه به همان ترتیب خروجی سنسور را در یک قالب یا بسته قرار داده و به کنترل کننده ارسال می نماید. در پیاده سازی عملی، چندین کنترل کننده می توانند در یک واحد سخت افزاری قرار گیرند تا به مدیریت حلقه های چندگانه در سیستم کنترل تحت شبکه با ساختار مستقیم بپردازند.



شکل (۷-۱) سیستم کنترل تحت شبکه با ساختار سلسله‌ای



شکل (۸-۱) سیستم کنترل تحت شبکه با ساختار مستقیم

بسته به نیازهای کاربرد مورد نظر و اولویت‌های طراح، هر دو ساختار مستقیم و یا سلسله‌ای استفاده خواهند شد. راهکارهای کنترلی برای هر دو ساختار یکسان خواهند بود زیرا می‌توان سیستم حلقه بسته محلی را بعنوان یک دستگاه خالص در نظر گرفت [۱].

۷-۱- کاربرد

شبکه‌های داده در کاربردهای کنترل، بعنوان رسانه‌ای جهت انتقال داده‌های کنترلی مانند سیگنال‌های کنترل، سیگنال‌های هشدار و خروجی سنسورها برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کل، دو دسته اصلی از سیستم‌های کنترل که از شبکه استفاده می‌کنند عبارتند از:

□ سیستم‌های کنترل پیچیده

این سیستم، یک سیستم کنترل پیچیده شامل چندین زیرسیستم است که هر زیرسیستم به خودی خود یک سیستم کنترل می‌باشد و دارای سنسور، کنترل‌کننده و عملگر است. در بسیاری از موارد

سنسورها و عملگرها متصل به دستگاهی می‌باشند که در محل دیگری جدا از کنترل‌کننده قرار دارند. از آنجائیکه اندازه یک سیستم پیچیده بزرگ است و تعداد اتصالات آن زیاد خواهد بود، نصب و نگهداری آن مشکل است. پس استفاده از شبکه در این نوع سیستم‌ها مفید واقع می‌گردد.

□ سیستم‌های کنترل از راه دور

این سیستم‌ها شامل سیستم‌های فراگیری داده و سیستم‌های نظارت از راه دور می‌باشند که برای دو هدف کلی مورد استفاده قرار می‌گیرند: آسودگی و امنیت. این سیستم‌ها عدم نیاز به سفرهای مداوم طولانی مدت و امنیت در محیط‌های خطرناک را برای بشر به ارمغان می‌آورد [۷].

هر دو ساختار مستقیم و سلسله‌ای در سیستم‌های کنترل تحت شبکه کاربرد دارند. جهت اشاره می‌توان موارد زیر را نام برد.

برای ساختار مستقیم:

▪ آزمایشگاه یادگیری از راه دور [۸]

▪ سیستم کنترل موتور DC از راه دور [۹]

▪ سیستم کنترل پیچیده هواپیما [۱۰]

▪ سیستم تعلیق خودرو [۱۱]

▪ دستگاه استخراج اکسیژن [۱۲]

برای ساختار سلسله‌ای:

▪ ربات‌های سیار [۱۳]

▪ عملکرد از راه دور [۱۴]

▪ جراحی از راه دور [۱۵]

▪ رباتیک فضایی [۱۶].

در این پایان نامه با در نظر گرفتن تاثیر تاخیر تصادفی در سیستم با ساختار مستقیم تلاش گردیده تا

بتوان سیستم را به گونه‌ای کنترل نمود که تاخیر تاثیر چندانی در سیستم نداشته باشد. بعلاوه، تغییر واحد در نقطه تنظیم و اغتشاش بار نیز به سیستم اعمال شده است.

فصل ۲:

تاخیر در سیستم‌های کنترل تحت شبکه و

راهبردهای پیشین

۲-۱ - مقدمه

از آنجائیکه شبکه به سیستم کنترل متصل است؛ عملکرد کلی سیستم کنترل تحت شبکه، صرف نظر از نوع شبکه استفاده شده، همواره تحت تاثیر تاخیرهای شبکه قرار می‌گیرد. تاخیرها بعنوان یکی از علل کاهش عملکرد یک سیستم کنترل شناخته شده‌اند. سیستم کنترل حلقه باز مانند سیستم رله روشن-خاموش در دستگاه صنعتی، بطور چشمگیری تحت تاثیر تاخیرهای شبکه قرار نمی‌گیرند. با این حال، تنظیمات کنترل حلقه باز ممکن است برای برنامه‌های کاربردی حساس به زمان کنترلی مانند رباتیک از راه دور و جراحی از راه دور که دارای کارایی بالایی هستند، مناسب و کافی نباشد. این برنامه‌ها جهت تصحیح خطای خروجی، به داده بازخوردی که در سراسر شبکه ارسال شده نیاز دارند. روش‌های کنترلی موجود که بر اساس تاخیر زمانی ثابت می‌باشند، ممکن است بصورت مستقیم برای کنترل یک سیستم تحت شبکه، به ویژه اینترنت مناسب نباشند، زیرا معمولاً تاخیرها متغیر با زمان هستند. بنابراین جهت کنترل تاخیرهای شبکه در یک سیستم کنترل حلقه بسته تحت شبکه روشی پیشرفته مورد نیاز است.

۲-۲ - تاخیر در حلقه

در سیستم‌های کنترل تحت شبکه علاوه بر تاخیر پردازش کنترل‌کننده‌ها، تاخیر شبکه نیز وجود دارد. این تاخیر به علت انتقال داده بین کنترل‌کننده و سیستم راه دور از طریق شبکه می‌باشد. تاخیر شبکه در سیستم‌های کنترل تحت شبکه را می‌توان بصورت زیر دسته بندی کرد:

▪ تاخیر سنسور به کنترل‌کننده τ^{sc}

▪ تاخیر کنترل‌کننده به عملگر τ^{ca}

که بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} \tau^{sc} &= t^{cs} - t^{se} \\ \tau^{ca} &= t^{rs} - t^{ce} \end{aligned} \quad (1-2)$$

که در آن t^{se} لحظه‌ای از زمان است که سیستم راه دور خروجی سنسور را جهت ارسال در بسته قرار می‌دهد، t^{cs} لحظه‌ای از زمان است که کنترل‌کننده شروع به پردازش داده در بسته دریافتی می‌کند، t^{ce} لحظه‌ای از زمان است که کنترل‌کننده اصلی، سیگنال کنترل را برای ارسال در بسته قرار می‌دهد و t^{rs} لحظه‌ای از زمان است که سیستم راه دور شروع به پردازش سیگنال کنترل می‌کند.

هر یک از تاخیرهای شبکه می‌تواند بزرگتر یا کوچکتر از زمان نمونه‌برداری T باشد. با فشردن تاخیر پردازش کنترل‌کننده τ^c و هر دو تاخیر شبکه، می‌توان تاخیر کنترل τ را برای سهولت در تجزیه و تحلیل به کار برد. این روش در بعضی از روش‌های کنترل تحت شبکه استفاده می‌شود. اگرچه تاخیر پردازش کنترل‌کننده τ^c همواره وجود دارد ولی در مقایسه با تاخیر شبکه بسیار کوچک بوده و قابل صرف نظر است. به علاوه، در بعضی موارد ممکن است زمان‌های نمونه‌برداری کنترل‌کننده اصلی و کنترل‌کننده راه دور متفاوت باشند.

تاخیرهای τ^{sc} و τ^{ca} از بخش‌های زیر تشکیل شده‌اند:

- تاخیر زمان انتظار τ^W : مدت زمانی که منبع (کنترل‌کننده اصلی یا سیستم راه دور) قبل از ارسال یک قالب یا بسته به خارج، در صف می‌ماند یا به انتظار برای در دسترس قرار گرفتن شبکه صرف می‌نماید.
- تاخیر زمان قالب τ^F : مدت زمانی که منبع برای قرار دادن یک قالب یا بسته در شبکه صرف می‌نماید.
- تاخیر انتشار τ^P : مدت زمانی که یک قالب یا بسته، رسانه‌ای فیزیکی را طی می‌نماید. این تاخیر به سرعت انتقال و فاصله میان منبع و مقصد بستگی دارد.

این سه بخش، تاخیرهای اصلی هستند که در یک شبکه محلی رخ می‌دهند. زمانی که داده کنترل و یا داده سنسور، طول شبکه‌ها را طی می‌کند ممکن است تاخیرهای دیگری نیز مانند تاخیر صف در

یک سوئیچ و یا مسیریاب، تاخیر انتشار میان گره‌های شبکه و ... وجود داشته باشد که معمولاً در نظر گرفته نمی‌شوند و علت اصلی آن نیز کوچک بودن اینگونه تاخیرها در مقابل تاخیرهای شبکه است. تاخیرهای τ^{sc} و τ^{ca} به فاکتورهای دیگری هم مانند حداکثر پهنای باند (از مشخصات پروتکل‌ها) و اندازه قالب‌ها یا بسته‌ها بستگی دارند.

۲-۳- اثرات تاخیر در حلقه

۲-۳-۱- کاهش عملکرد

تأخیر در حلقه کنترل بصورت گسترده‌ای بعنوان کاهش دهنده عملکرد یک سیستم کنترل شناخته شده‌اند که در سیستم‌های کنترل تحت شبکه نیز به همین صورت است. کاهش عملکرد در سیستم‌های کنترل با کنترل‌کننده PID زمانی که تاخیر در هر دو کانال ثابت باشد، بصورت آشکار خود را به شکل افزایش زمان نشست و همچنین افزایش میزان فراجهدش ظاهر می‌کند. صورت‌های دیگر کاهش عملکرد می‌تواند بر اساس معیارهای گوناگون عملکرد ارزیابی شود. بررسی‌ها روی تأثیرات تأخیر بر معیارهای عملکرد می‌تواند برای ایجاد و توسعه روش‌های مناسب کنترل تحت شبکه استفاده شود.

۲-۳-۲- ناپایداری

تأخیر در حلقه کنترل مانند تاخیرهای شبکه، سبب کاهش حاشیه پایداری سیستم شده که منجر به ناپایداری می‌گردد. هرچه تاخیر بزرگتر باشد، شاخه‌های اصلی مکان ریشه سیستم بیشتر به سمت راست محور موهومی خم می‌شوند و فاصله نقاط تلاقی شاخه‌ها با محور موهومی از هم کوچکتر می‌شود که نشان دهنده باریکتر شدن ناحیه پایداری است. برای مثال ضرایب یک کنترل‌کننده PI بازه کوچکتری از مقادیر شدنی را برای پایداری سیستم حلقه بسته در برمی‌گیرند.

مطالعات متعددی جهت بدست آوردن معیار پایداری برای سیستم کنترل تحت شبکه وجود دارد، تا پایدار ماندن این سیستم‌ها در شرایط خاص را تضمین نماید. اگرچه هیچ روش عمومی برای تحلیل پایداری وجود ندارد که بر تمام سیستم‌های کنترل تحت شبکه اعمال شود. بیشتر روش‌های تحلیل پایداری بر اساس پیکربندی شبکه، پروتکل‌های شبکه، فرضیات و روش‌های کنترل می‌باشند [۱].

۲-۴- راهبردهای پیشین

کاهش اثر مشکلات ذکر شده از راه‌های بسیار زیادی امکان‌پذیر است. یک روش، بهبود پروتکل‌های مختلف انتقال می‌باشد که مسئولیت مسیریابی بسته‌ها در شبکه را بر عهده دارند [۱۷]. روش دیگر، تعبیه و پیاده‌سازی سیاست‌های مختلف کنترل برای مدنظر قرار دادن تاخیر شبکه و اتلاف می‌باشد [۱۸]. در [۴] سیستم کنترل تحت شبکه بصورت یک سیستم پویای ناهمزمان نشان داده شده که در آن، شبکه فقط بین سنسور و کنترل‌کننده وجود دارد. تحلیل پایداری چنین سیستم‌هایی با استفاده از نامساوی‌های ماتریس دوخطی^۱ در چارچوب لیاپانوف انجام شده است. با بکارگیری مفهوم سیستم‌های تعویض شده [۱۸] و بالا بردن دوره نمونه‌برداری [۱۹]، سیستم‌های کنترل تحت شبکه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. در [۲۰]، [۲۱] برای حل مشکلات مذکور در کنترل این سیستم‌ها از ترکیب مفهوم حاشیه بحرانی برای تاخیرهای متغیر با زمان و فرمول‌بندی قوانین مختلف تنظیم PID بهره گرفته شده است. بهینه‌سازی مجموع وزن دار انتگرال قدرمطلق خطا^۲ با انتگرال مجذور خروجی^۳ برای یافتن ضرایب بهینه کنترل‌کننده با الگوریتم ژنتیک در [۲۲] و با الگوریتم تجمع ذرات در [۲۳] انجام شده است.

رویکردهای متفاوتی بر اساس نوع پیکربندی و رفتار شبکه در برخورد با مشکلات ناشی از تاخیر ارائه

¹ Bilinear Matrix Inequalities (BMIs)

² Integral of Time-weighted Absolute Error (IAE)

³ Integral of Squared controller Output (ISCO)

شده‌اند که در ادامه بعضی از آن‌ها به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

۲-۴-۱- رویکرد مدل زمان گسسته قطعی تعمیم یافته

این روش برای کنترل دستگاه خطی زیر از طریق شبکه با تاخیر دوره‌ای ارائه شده است.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k), \quad (2-2)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (3-2)$$

که در آن $\Phi = \exp(AT)$, $\Gamma = \int_0^T \exp(A\zeta) d\zeta B$ و $\{A, B, C\}$ تحقق سیستم می‌باشند.

کنترل‌کننده خطی استفاده شده در این روش بصورت زیر است

$$\xi(k+1) = F\xi(k) - Gz(k), \quad (4-2)$$

$$u(k) = H\xi(k) - Jz(k) \quad (5-2)$$

که در آن ξ کنترل‌کننده بردار حالت، $i = \{1, \dots, j\}$ ، $z(k) = y(k-i)$ خروجی‌های قبلی می‌باشند در لحظه‌ای که $u(k)$ توسط کنترل‌کننده پردازش می‌شود. $\{F, G, H, J\}$ ثابت توصیف‌کننده دینامیک‌های کنترل‌کننده می‌باشند که u در رابطه (۵-۲) خروجی آن است. ایده اصلی این روش برای کنترل تاخیر شبکه، ترکیب دو رابطه (۲-۲) و (۵-۲) بصورت زیر می‌باشد.

$$X(k+1) = \Omega(k+1)X(k) \quad (6-2)$$

در آن $\Omega(k+1)$ ماتریس تبدیل حالت تعمیم یافته است که با استفاده از $\{\Phi, \Gamma, C, F, G, H, J\}$ محاسبه شده و بردار حالت تعمیم یافته بصورت رابطه (۷-۲) می‌باشد [۱].

$$X(k) = \left[x^T(k), y^T(k-1), \dots, y^T(k-j), \xi^T(k), u^T(k-1), \dots, u^T(k-l) \right]^T \quad (7-2)$$

۲-۴-۲- رویکرد صفبندی

مکانیزم‌های صفبندی می‌تواند در یک سیستم کنترل تحت شبکه برای تغییر شکل تاخیرهای تصادفی شبکه به تاخیرهای معین استفاده شود به گونه‌ای که سیستم کنترل تحت شبکه نامتغیر با زمان گردد. رویکرد کنترل برای سیستم کنترل تحت شبکه که براساس این مکانیزم‌ها باشند، رویکرد صفبندی نامیده می‌شود. این روش‌ها با بکارگیری برخی اطلاعات احتمالی و یا معین یک سیستم کنترل تحت شبکه برای فرمول‌بندی الگوریتم کنترل ایجاد شده‌اند.

اولین رویکرد صفبندی، روش جبران‌سازی تاخیر معین بر اساس پیش‌بینی می‌باشد که در آن از یک رویکرد برای تخمین حالت‌های دستگاه و از یک پیش‌بینی برای محاسبه کنترل براساس خروجی‌های قبلی استفاده شده است.

رویکرد دیگری که در این دسته قرار می‌گیرد، رویکرد جبران‌سازی تاخیر احتمالی براساس پیش‌بینی نامیده می‌شود که از آن برای کنترل NCS با تاخیر تصادفی استفاده می‌گردد. در این رویکرد اطلاعات احتمالی همراه با تعداد بسته‌های موجود در یک صف برای بهبود حالت پیش‌بینی بکار گرفته می‌شود. با این وجود، این رویکرد به تنهایی یک الگوریتم کنترل حقیقی نیست و بیشتر شبیه به طرحی برای پیش‌بینی متغیرهای حالت می‌باشد؛ در این صورت با مشخص بودن متغیرهای پیش‌بینی شده، یک قانون کنترل با هر الگوریتم کنترلی می‌تواند بر این رویکرد اعمال گردد [۱].

۲-۴-۳- رویکرد کنترل اتفاقی بهینه

این رویکرد برای کنترل سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر تصادفی ارائه شده است که با تاثیرات ناشی از تاخیر تصادفی شبکه در این سیستم‌ها همانند مسئله گوسی مرتبه دوم خطی^۱ برخورد می‌کند. در این رویکرد فرض بر آن است که تاخیر همواره از زمان نمونه‌برداری کوچکتر بوده و در صورت در دسترس بودن اطلاعات کامل حالت، هدف اصلی کمینه نمودن تابع هدف زیر می‌باشد.

¹ Linear Quadratic Gaussian (LQG)

$$J(k) = E \left[x^T(N) Q_N x(N) \right] + E \sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \quad (8-2)$$

که در آن $E[\cdot]$ مقدار امید ریاضی، Q_N و Q ماتریس‌های وزن دهی می‌باشند. قانون کنترل برای بازخورد حالت بهینه با استفاده از برنامه‌ریزی پویا بصورت زیر توصیف می‌شود.

$$u(k) = -L(k, \tau_k) \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} \quad (9-2)$$

که در آن L ماتریس بهره بهینه حاصل از حل مسئله LQG و τ_k تاخیر نامستقل شبکه است. در صورت نبود اطلاعات کامل حالت می‌توان از فیلتر کالمن برای رابطه (4-7) استفاده نمود [۱].

۲-۴-۴- رویکرد آشفته‌نگی

این رویکرد را می‌توان بر سیستم‌های کنترل تحت شبکه با تاخیر دوره‌ای و یا تصادفی در کانال سنسور به کنترل‌کننده اعمال نمود که در آن با استفاده از نظریه آشفته‌نگی و غیرخطی، تاثیرات تاخیر شبکه یک سیستم زمان پیوسته با فرض عدم وجود نویز رویت فرمول‌بندی شده‌اند. شبکه ذکر شده به شبکه‌های بر اساس اولویت محدود شده‌اند که می‌توانند اولویت‌های مختلفی را به انتقال داده‌ها نسبت دهند. این اولویت‌ها را می‌توان با الگوریتم‌های زمان‌بندی اولویت مدیریت نمود. بعلاوه، این رویکرد به زمان نمونه‌برداری بسیار کوچکی نیاز دارد تا سیستم کنترل تحت شبکه بعنوان سیستم زمان پیوسته تقریب زده شود. حلقه کنترلی در این رویکرد شامل دستگاه و کنترل‌کننده غیرخطی می‌باشد اما تحلیل‌ها براحتی برای دستگاه خطی نیز بکار برده می‌شوند [۱].

۲-۴-۵- رویکرد زمان‌بندی زمان نمونه‌برداری

در این رویکرد زمان نمونه‌برداری مناسب برای سیستم کنترل تحت شبکه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که تاخیر شبکه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سیستم کنترل نگذارد و سیستم پایدار باقی بماند.

این رویکرد در سیستم‌های کنترل تحت شبکه چندگانه با تاخیر دوره‌ای و در شبکه با تاخیر تصادفی مانند CAN استفاده می‌شود که در حالت دوم می‌بایست تاخیر همواره کمتر از زمان نمونه‌برداری بوده و فقط بر سیستم‌های کنترل تحت شبکه یک بُعدی قابل اعمال است. بطور خلاصه رویکرد زمان‌بندی زمان نمونه‌برداری با فرض آنکه تعداد سیستم‌های کنترل تحت شبکه موجود بر روی شبکه برابر M باشد، با توجه به زمان نمونه‌برداری حساس‌ترین سیستم کنترل موجود بر اساس تحلیل حوزه فرکانس در بدترین حالت کران تاخیر، زمان نمونه‌برداری را برای سایر سیستم‌ها محاسبه می‌نماید. حساس‌ترین سیستم کنترل تحت شبکه، کمترین زمان نمونه‌برداری را دارد [۱].

۲-۴-۶- رویکرد بر اساس رویداد

این رویکرد برای کنترل تحت شبکه ربات از طریق اینترنت ارائه شد و در اصل برای ساختار سلسله‌ای استفاده می‌شود اما بر ساختار مستقیم نیز قابل اعمال است. در این رویکرد با بکارگیری نگاهت مرجع حرکت، به جای زمان از یک حرکت سیستم بعنوان مرجع سیستم استفاده می‌شود و این موضوع سبب می‌گردد که تاخیر زمانی موجب ناپایداری این سیستم‌ها نشود. مرجع حرکت می‌بایست یک تابع غیرنزولی براساس زمان باشد تا پایداری سیستم تضمین گردد [۱].

۲-۴-۷- رویکرد تطبیق کنترل کاربر نهایی

مفهوم اصلی این رویکرد، تطبیق پارامترهای کنترل‌کننده با توجه به شرایط ترافیک کنونی شبکه یا کیفیت خدمات^۱ کنونی شبکه می‌باشد و در آن فرض بر این است که کنترل‌کننده و سیستم راه دور قادر به اندازه‌گیری شرایط ترافیک شبکه بوده و در این حالت برای اندازه‌گیری آن می‌توان از یک میان‌افزار استفاده نمود [۱].

¹ Quality of Service (QoS)

۲-۴-۸- رویکرد کنترل مقاوم

با استفاده از نظریه کنترل مقاوم، کنترل کننده تحت شبکه‌ای در حوزه فرکانس طراحی شده است که مزیت اصلی آن عدم نیاز به اطلاعات پیشین توزیع احتمال تاخیرهای شبکه می‌باشد. در این رویکرد فرض بر آن است که تاخیرهای هر دو کانال کراندار بوده و توسط مدل جریان مایع تقریب زده می‌شوند. همچنین این تاخیرها بصورت آشفتگی ضربی همزمان مدلسازی می‌شوند [۱].

۲-۴-۹- رویکرد مدولاسیون منطق فازی

این رویکرد برای سیستم کنترل تحت شبکه با دستگاه خطی و کنترل کننده مدوله شده PI جهت جبران سازی تاثیرات تاخیر شبکه، بر اساس منطق فازی ارائه شده است. در این رویکرد ضرایب کنترل کننده PI بطور مجزا در خروجی کنترل کننده با توجه به خطای خروجی سیستم به روز رسانی می‌شوند. بنابراین کنترل کننده PI نیاز به بازطراحی، تغییر و یا وقفه نداشته تا راحتی در محیط تحت شبکه استفاده شود [۱].

در کل، موضوعات تحقیق در حوزه سیستم‌های کنترل تحت شبکه شامل مسائل مدلسازی، تحلیل پایداری، کنترل و فیلترینگ می‌باشد [۷]، [۲۴]، [۲۵]، [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲]، [۳۳]، [۳۴]. در این راستا کارهای بسیاری انجام شده است، از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

کنترل بازخورد خروجی H_{∞} برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه با اتلاف بسته‌ها در هر دو کانال ارتباطی (کنترل کننده به سنسور و سنسور به کنترل کننده) که بصورت زنجیره‌های مارکوف مستقل مدلسازی شده‌اند در [۲۴] بررسی شده است.

جهت طراحی کنترل کننده‌های بازخورد حالت برای این سیستم‌ها، روش‌های نمونه برداری داده ایجاد شده‌اند [۲۶] و [۳۵]. گیرنده‌ها و کنترل کننده‌های دیجیتال زمان محور در [۲۶] مدنظر قرار گرفته است و سیستم کنترل تحت شبکه بصورت سیستم نمونه برداری داده تاخیردار مدلسازی شده که این

تاخیر در زیرسیستم زمان گسسته قرار داده شده.

مسئله فیلترینگ H_∞ برای یک مجموعه از سیستم‌های زمان گسسته تحت شبکه با تاخیر انتقال نامشخص در [۲۷] مطالعه شده است که در آن فرض شده تاخیر تصادفی سنسور به فیلتر در مشخصه‌های مارکوف صدق می‌نماید اما احتمالات تبدیل مقدار تاخیر تا حدودی نامشخص می‌باشد. این تحقیق شرایط کافی برای پایداری سیستم فیلترینگ خطا را بدست آورده که با استفاده از رویکرد تابعی وابسته به حالت لیاپانوف، کران سطح میرایی اغتشاش H_∞ توصیه شده را تضمین می‌نمایند و بر اساس شرایط بدست آمده یک روند برای طراحی فیلتر H_∞ نیز ارائه شده است.

بر اساس روش لیاپانوف-رازومیخین، وجود تخمین‌گر خطای وابسته به تاخیر از نظر حل‌پذیری نامساوی‌های ماتریس دوخطی^۱ در [۲۸] بررسی شده که تخمین خطای مقاوم را برای یک مجموعه از سیستم‌های کنترل تحت شبکه نامعین با تاخیر تصادفی توصیف شده با فرآیندهای مارکوف مورد مطالعه قرار داده است. همچنین یک الگوریتم تکرار شونده برای تبدیل مسئله نامحدب نامساوی ماتریس دوخطی به مسئله بهینه‌سازی شبه محدب در آن پیشنهاد شده که با ابزار ریاضی موجود قابل حل می‌باشد.

فیلتر ورودی و فیلتر خطی بهینه حالت در کمترین مربعات با استفاده از تکمیل رویکرد مربع توسط خروجی کنونی و قبلی در [۲۹] طراحی شده‌اند، که به مطالعه تخمین‌گر بهینه خطی برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه دارای اتلاف بسته‌ها در هر دو کانال رفت و برگشت می‌پردازد. این تحقیق پدیده اتلاف بسته‌ها را با استفاده از دو متغیر تصادفی دو طرف مجزا توصیف نموده که در توزیع برنولی صدق می‌نمایند.

بررسی کنترل مد لغزشی بازخورد خروجی برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه در [۳۲] انجام شده که ایده اصلی آن استفاده از ورودی‌های قبلی علاوه بر خروجی‌های قبلی و کنونی برای بازسازی متغیرهای حالت می‌باشد و کنترل‌کننده مد لغزشی برای سیستم‌های دارای تاخیر ثابت و متغیر با

¹ Bilinear Matrix Inequalities (BMIs)

زمان طراحی شده است.

جبران تاخیر برای سیستم‌های کنترل غیرخطی تحت شبکه با استفاده از مشخصه‌های انتقال بسته‌ها در این سیستم‌ها در [۳۳] مطالعه شده است و رویکردهای جدیدی جهت جبران تاخیر این سیستم‌ها در چارچوب کنترل‌کننده فازی تاکاگی سوگنو^۱ برای دستگاه غیرخطی پیشنهاد شده‌اند.

پیچیدگی زمانی از نظر تاخیر در سیستم‌های کنترل تحت شبکه افزایش می‌یابد و سبب الزام مطالعه رفتار این تاخیرها و معادلات دیفرانسیل مدلسازی رفتار تاخیر می‌گردد. [۳۶] با استفاده از برنامه‌ریزی تبادل پویا، مقابله با تاخیر چندگانه همزمان با خطاهای محدود شده را نشان می‌دهد.

روش‌های اتفافی با استفاده از تعریف‌های گوناگون اتفافی حول مسئله تاخیر شبکه و اتلاف بسته‌ها پیشنهاد شده‌اند [۳۷]. معیار طراحی کنترل‌کننده پایدارساز و پایداری اتفافی برای پایدارسازی سیستم‌های کنترل تحت شبکه خطی با تاخیر ورودی اتفافی در [۳۷] با استفاده از اطلاعات احتمال توزیع تاخیرها بدست آمده است.

رویتگر کوانتیزه بر اساس کنترل بازخورد خروجی در [۳۸] و [۳۹] بررسی شده است. برای پایدارسازی سیستم تحت شبکه کنترل حلقه بسته با تاخیر تصادفی در [۳۹] کنترل‌کننده بر اساس رویتگر بررسی شده است.

کنترل‌کننده بازخورد خروجی پویا، برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه تاخیردار در [۴۰] و [۴۱] طراحی شده، دستگاه و کنترل‌کننده پویا در [۴۰] زمان پیوسته می‌باشند و کنترل‌کننده پویا با وجود کانال مخابراتی بین خروجی دستگاه و ورودی کنترل‌کننده، برای تضمین پایداری سیستم حلقه بسته طراحی شده است. همچنین [۴۲] و [۴۳] به طراحی کنترل‌کننده‌های بازخورد خروجی برای این سیستم‌ها که دارای اتلاف بسته می‌باشند، پرداخته است. در [۴۲] کنترل‌کننده فازی H_∞ بازخورد خروجی جهت پایداری نمایی سیستم کنترل فازی تاکاگی سوگنو طراحی و تحلیل شده.

در [۴۴] رویکردهای کنترل تاخیر بازخورد حالت جبرانی (که کنترل پیش‌بین تحت شبکه نیز نامیده

¹ Takagi-Sugeno (TS)

می‌شود) پیشنهاد شده‌اند. کنترل پیش‌بین داده محور برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه را که شامل مولد پیش‌بین کنترل و جبران‌ساز تاخیر شبکه می‌باشد، [۴۴] با بکارگیری تکنیک ماتریس‌های زیرفضا بررسی می‌نماید. این ماتریس‌ها مستقیماً از داده‌های ورودی-خروجی انتقال یافته در شبکه بدست آمده‌اند.

در [۴۵] تحلیل مدل جدید تبدیل سیستم‌های فازی تاکاگی سوگنو زمان گسسته با تاخیرهای متغیر با زمان و بکارگیری آن برای کنترل‌کننده بازخورد خروجی پویا بررسی شده است. همچنین مدل جدیدی برای حالت تاخیر متغیر با زمان با استفاده از یک تقریب جدید پیشنهاد شده و سپس با روش تقسیم بندی تاخیر، تحلیل بهره کوچک برای این مدل انجام شده است.

الگوریتم کنترل فازی هوش شبیه‌سازی شده انسان را [۴۶] برای عملکرد بهتر در الگوریتم کنترل با استفاده از توانایی ضد تداخل کنترل فازی و ترکیب آن با کنترل هوش شبیه‌سازی شده انسان طراحی می‌نماید و بر روی سیستم‌های کنترل تحت شبکه اعمال می‌کند.

چارچوب جدید کنترل فازی پیش‌بین را [۴۷] برای مقابله با تاخیرهای تصادفی موجود در کانال رفت ارائه می‌نماید. در این روش از خطای بین خروجی مرجع و خروجی پیش‌بین و تغییرات خطا بعنوان ورودی‌های کنترل‌کننده فازی استفاده می‌شود.

در سیستم‌های کنترل فازی تحت شبکه، اشتراک گذاری فرضیات یکسان در دستگاه فازی و کنترل‌کننده‌های فازی که ویژگی مطلوب اتصال نقطه به نقطه است، به علت حضور شبکه انتقال مخابراتی غیر قابل استفاده می‌باشد. در [۴۸] شرایط پایداری سیستم‌های فازی تاکاگی سوگنو تحت شبکه مشروط به درجات عضویت ناهمزمان ارائه می‌شود و روش جدیدی برای بازسازی درجات عضویت در مقیاس زمان برای کنترل‌کننده همانند دستگاه بکار گرفته شده است.

پایداری اتفاقی مجموعه‌ای از سیستم‌های کنترل تحت شبکه زمان گسسته با تاخیر نامعین شبکه و اتلاف بسته‌ها با استفاده از رویکرد کنترل فازی غیرمتمرکز در [۴۹] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق سیستم‌های غیرخطی در قالب تاکاگی سوگنو مدل شده‌اند و سپس کنترل بازخورد حالت

فازی غیرمتمرکز با در نظر گرفتن اتلاف بسته‌ها بکارگرفته شده.

[۵۰] به کنترل سیستم‌های غیرخطی تحت شبکه در حضور اتلاف بسته‌ها، پدیده نمونه‌برداری وابسته و تاخیر اختصاص یافته است. در این تحقیق جهت افزایش کاربرد رویکرد فازی تاکاگی سوگنو، متغیرهای مفروض کنترل‌کننده و دستگاه فازی بصورت ناهمزمان قرار گرفته و سپس به کنترل مسئله ناهمزمانی پرداخته می‌شود.

سیستم‌های کنترل تحت شبکه برای حل مشکل ارتباط بر اساس تاخیرهای اتصال ناشی از عوامل خارجی، از تقریب مشترکی استفاده می‌کنند. این رویکرد از نظر تاخیر و اتلاف فاز محلی ذاتی پیچیده است. در [۵۱] راهی نشان داده شده که پارامترهای پویای پاسخ برنامه‌ریزی تقریب بلادرنگ با در نظر گرفتن موقعیت فاز محلی، شامل فرکانس انتقال داده و تاخیرهای کراندار باشند. همچنین قانون کنترل مربوطه با در نظر گرفتن تقریب فازی تطبیقی برای تاخیرهای اتصال غیرخطی طراحی شده است.

[۵۲] به مسئله پایدارسازی سیستم کنترل تحت شبکه بر اساس مدل فازی تاکاگی سوگنو اختصاص یافته است. متغیرهای مفروض در قوانین فازی کنترل‌کننده (که با متغیرهای مفروض سیستم‌های فازی تاکاگی سوگنو در محیط شبکه مقایسه شده‌اند) مقیاس زمانی متفاوتی دارند. همچنین با استفاده از محدوده تغییرات توابع عضویت نامتقارن، شرط کافی تضمین پایداری مجانبی با شاخص عملکرد H_{∞} برای سیستم‌های حلقه بسته بدست آمده است.

مدل فازی بر اساس پایداری مقاوم سیستم‌های کنترل غیرخطی تحت شبکه در حضور تاخیر انتقال وقفه و ورودی‌های ازدست رفته با استفاده از رویکرد تاخیر تصادفی در [۵۳] مورد بررسی قرار گرفته است. توزیع بلادرنگ تاخیر ورودی ناشی از تاخیر و وقفه انتقال بصورت فرآیند وابسته توزیع شده غیریکسان مدلسازی گشته و پدیده اتلاف ورودی بصورت فرآیند برنولی ارائه شده است. سیستم فازی تاکاگی سوگنو با سوئیچ تصادفی در حضور زیرسیستم‌های تاخیر ورودی چندگانه برای مدلسازی سیستم‌های کنترل تحت شبکه غیرخطی پیشنهاد شده‌اند. همچنین شرط کافی پایداری نمایی مقاوم

میانگین مربعات را با استفاده از روش لیاپانوف-کراسوفسکی بهبود یافته بدست می‌آورد که توزیع بلادرنگ تاخیر ورودی را نیز در نظر می‌گیرد. در [۵۴] نیز مشابه این روش برای بدست آوردن شرط کافی پایداری نمایی میانگین مربعات بکار گرفته شده است.

ترکیب جبران‌ساز تخمین زده شده اسمیث با بافر و کنترل‌کننده فازی تطبیقی PID در [۵۵] روش کنترلی جدیدی برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه در حضور تاخیر، اتلاف بسته‌ها و اختلال سیگنال^۱ طراحی شده است.

[۵۶] یک سیستم زمان پیوسته و کنترل‌کننده زمان گسسته را در نظر گرفت و با استفاده از روش زمان گسسته سیستم کنترل و ارتباطات یکپارچه^۲ را تحلیل نمود. در آن یک کنترل‌کننده کلاک محور بدون همگام‌سازی میان دستگاه و کنترل‌کننده مطالعه شده است و سیستم توسط یک بردار حالت تکمیل شده توصیف می‌شود که مقادیر پیشین ورودی و خروجی دستگاه را علاوه بر بردارهای حالت کنونی دستگاه و کنترل‌کننده در بر می‌گیرد. تمام اینها به مدل زمان گسسته متغیر با زمان می‌انجامد که دارای بُعد محدود است. همچنین رد شدن پیام و نمونه‌برداری خالی را نیز مد نظر قرار می‌دهد.

[۵۷] سیستم کنترل تحت شبکه را در حوزه زمان گسسته تحلیل می‌نماید. بعلاوه، تاخیرهای شبکه را بصورت ثابت و تصادفی به وسیله زنجیره مارکوف مدل نموده. سپس، مسئله کنترل بهینه LQG را حل می‌نماید. همچنین، به اهمیت پیام‌های نشانه شده زمانی اشاره دارد که سبب شناخت تاریخچه سیستم می‌شود.

[۵۸] یک دستگاه پیوسته و کنترل‌کننده پیوسته را در نظر گرفته است. شبکه کنترل که توسط گره‌های دیگر به اشتراک گذاشته شده، فقط میان گره‌های سنسور و کنترل‌کننده قرار داده شده. در

¹ Signal jamming

² Integrated Communication and Control Systems (ICCS)

این تحقیق مفهوم حداکثر بازه مجاز انتقال^۱ معرفی شده که با τ نشان داده می‌شود و فرض شده که پیام‌های متوالی سنسور حداکثر با τ ثانیه از هم جدا شده‌اند. هدف یافتن آن مقدار از τ است که تضمین کند عملکرد (بعنوان مثال پایداری) مطلوب سیستم کنترل تحت شبکه حاصل شده است. فرض می‌شود که سیستم بازخورد بدون وجود شبکه بصورت زیر باشد:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_{11}x(t) \\ x(t) &= [x_p(t), x_c(t)]^T \end{aligned} \quad (10-2)$$

که در آن x_p و x_c حالت دستگاه و کنترل‌کننده را نشان می‌دهند. این سیستم بصورت نمایی پایدار فراگیر است. بنابراین یک P وجود دارد بطوریکه:

$$A_{11}^T P + P A_{11} = -I \quad (11-2)$$

پس فرض می‌شود که تاخیرهای شبکه با خطای $e(t)$ قابل محاسبه هستند. به این ترتیب بردار حالت سیستم تحت شبکه بصورت زیر خواهد بود:

$$z(t) = [x^T(t), e^T(t)]^T \quad (12-2)$$

بنابراین سیستم کنترل حلقه بسته تحت شبکه بصورت زیر است:

$$\dot{Z}(t) = AZ(t), \quad A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (13-2)$$

در این تحقیق دو روش زمان‌بندی مطالعه شده است: TOD^۲ و TRT^۳ با زمان‌بندی استاتیک. با فرض

¹ Maximum Allowable Transfer Interval (MATI)

² Try Once Discard (TOD)

³ Token Ring Type (TRT)

آنکه P گره سنسور متصل به سیستم کنترل تحت شبکه وجود دارد، زمان بندی استاتیک، یعنی هر گره دقیقا پس از هر P انتقال با یک ترتیب ثابت انتقال انجام می دهد. با محدودیت MATI، کنترل کننده باید حداقل در هر τ ثانیه یک انتقال از سنسور دریافت نماید. از این رو، در زمان بندی استاتیک، تمام مقادیر سنسورها حداکثر در هر $P\tau$ ثانیه به روز رسانی می شوند. TOD یک پروتکل زمان بندی است که در آن گره ای با بیشترین وزن خطا در آخرین مقدار گزارش شده (به کنترل کننده) پیام خود را انتقال می دهد. باز هم محدودیت MATI تضمین می کند که این انتقال در هر τ ثانیه انجام می گردد. اگرچه TOD انتقال تمام گره ها را در هر P انتقال تضمین نمی نماید [۴].

تحلیل ساده پایداری برای یک سیستم زمان گسسته تاخیردار [۲] را می توان برای یک سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت به کار برد. سیستم های با تاخیر متناوب، نیازمند روش های پیچیده تری مبنی بر فرمولاسیون های مختلف سیستم می باشد. برای مثال، یک سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر متناوب [۵۶] زمانی پایدار است که تمام مقادیر ویژه یک فرمول خاص درون دایره واحد باشند. [۵۹] روش دیگری از تحلیل عمومی حوزه فرکانس را برای بررسی پایداری استفاده می کند اما معیار پایداری به سیستم تک بعدی محدود است. تحلیل پایداری برای سیستم های کنترل تحت شبکه با تاخیر تصادفی بسیار پیچیده تر بوده و به الگوریتم های پیشرفته تری نیاز دارد. روش های گوناگونی برای فرمولاسیون های مختلف سیستم های کنترل تحت شبکه استفاده شده است. برای مثال، در [۵۷] و [۶۰] پایداری سیستم های کنترل تحت شبکه بر اساس تحلیل تصادفی (اتفاقی) بررسی شده، اما با فرمولاسیون های متفاوت. کنترل غیرخطی و نظریه های اغتشاش برای تحلیل پایداری این سیستم ها با استفاده از لم بلمن گرونوال^۱ در [۵۸] اعمال شده است. در [۴] روشی با استفاده از سیستم های پیرید برای تحلیل پایداری این سیستم ها معرفی شده است.

¹ Bellman-Gronwall

فصل ۳:

بهینه‌سازی

۳-۱ - مقدمه

در این بخش مروری بر روش‌های بهینه‌سازی با رایج‌ترین کاربردهای مهندسی انجام می‌شود. این روش‌ها به دو دسته الگوریتم‌های محلی (بر اساس گرادیان) و الگوریتم‌های سراسری (بدون گرادیان) طبقه‌بندی می‌گردند. قالب استاندارد مسئله بهینه‌سازی مقید غیرخطی با یک تابع هدف که توسط روش‌های مختلفی حل می‌گردد به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Minimize: } & f(x) \\ \text{Subject to: } & g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m \\ & h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, p \\ & x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \tag{۱-۳}$$

در رابطه (۱-۳)، $f(x)$ تابع هدف، $g_j(x)$ تابع قید نامساوی و $h_k(x)$ تابع قید مساوی را نمایش می‌دهند. بردار x ارائه‌کننده n متغیر طراحی است که برای دستیابی به بهینه تغییر می‌کنند. فضای طراحی قابل جستجو با کران‌های بالا x_{iU} و پایین x_{iL} توصیف شده‌اند که شرط‌های مرزی نامیده می‌شوند. در کل، توابع هدف و قیدها می‌توانند خطی یا غیرخطی و صریح یا ضمنی باشند. توابع ضمنی زمانی پدیدار می‌شوند که برای مثال، شبیه‌سازی عددی (مانند شبیه‌سازی اجزای محدود) برای مقداردهی تابع پاسخ (مانند مقدار تنش) استفاده شده باشند. همچنین، متغیرهای طراحی نیاز به پیوسته بودن ندارند و در صورت محدودیت به مقادیر گسسته یا صحیح به مسائل بهینه‌سازی گسسته ارجاع داده می‌شوند.

در اصل الگوریتم‌های محلی در حل مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته یا صحیح با دشواری روبرو می‌شوند، در حالی که بسیاری از الگوریتم‌های سراسری با این دسته از مسائل به خوبی سازگاری دارند.

بیشتر الگوریتم‌های بهینه‌سازی شرط‌های مرزی را جدا از قیدهای نامساوی و مساوی در نظر می‌گیرند.

این شرطها می‌توانند با پیاده‌سازی مستقیم در الگوریتم بکار برده شوند و یک الگوریتم خوب هرگز هیچ یک از شرطهای مرزی را نقض نمی‌کند. مسئله بهینه‌سازی نامقید با وجود نداشتن هیچ قید مساوی یا نامساوی، ممکن است شرطهای مرزی داشته و بلعکس آن مسئله مقید یک یا تعداد بیشتری قید نامساوی و مساوی دارد که ممکن است با یا بدون شرطهای مرزی باشد. برای یک مسئله بهینه‌سازی مقید، قیدهای مساوی و نامساوی می‌توانند برقرار باشند یا نباشند، در حالیکه قید نامساوی ممکن است فعال نیز باشد. قید نامساوی فعال به $g(x) = 0$ گفته می‌شود.

روش‌ها یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای یافتن راه حل مسئله ذکر شده در رابطه (۳-۱) بکار گرفته می‌شوند. این روند شامل یافتن ترکیبی از مقادیر متغیرهای طراحی است که به ازای آن تابع هدف، بهترین مقدار را داشته و تمامی شرطهای مرزی و قیدهای مساوی و نامساوی نیز برقرار باشند [۶۱].

۳-۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی

بیشتر الگوریتم‌های محلی بر اساس گرادیان بوده و همانطور که از نام آن گویاست، روش‌های بهینه‌سازی بر اساس گرادیان با استفاده از اطلاعات گرادیان به یافتن حل بهینه رابطه (۳-۱) می‌پردازند. به دلایل مختلفی و بطور گسترده استفاده از الگوریتم‌های بر اساس گرادیان در حل انواع مسائل بهینه‌سازی مهندسی رایج می‌باشند. این دلایل شامل کارآمدی آنها از نظر تعداد مورد نیاز مقاردهی تابع برای یافتن بهینه، توانایی حل مسائل با تعداد متغیرهای بسیار زیاد و نیازمندی کمتر آنها به تنظیم پارامتر مختص مسئله می‌باشد. این الگوریتم‌ها دچار اشکالاتی همچون یافتن فقط یک بهینه محلی، مشکل در حل مسائل بهینه‌سازی گسسته، دشواری در پیاده‌سازی موثر و مستعد بودن در نویز پذیری عددی ناشی از پیچیدگی الگوریتم، می‌باشند [۶۱].

۳-۲-۱- پیش زمینه

الگوریتم‌های بر اساس گرادیان معمولاً از یک روند دو گامی برای رسیدن به بهینه استفاده می‌نمایند.

این روند دو گامی را می‌توان با استفاده از تصویر کودکی با چشمان بسته روی تپه، شکل (۳-۱) توضیح داد [۶۲]. در این مثال تپه تابع هدف است که کودک با متغیرهای متناظر با حرکتش (x و y) تلاش می‌کند با خارج نشدن از حصار موجود (قیدهای مسئله) خود را به بالاترین نقطه تپه برساند. کودک می‌تواند حرکتش را خارج از حصار شروع کند که در این حالت می‌بایست پاسخ شدنی را بیابد.

در قیاس با بهینه سازی بر اساس گرادیان، کودک می‌تواند با برداشتن یک قدم در راستای x و یک قدم در راستای y ، از اطلاعات بدست آمده‌اش راستایی را برای رسیدن به بالای تپه تخمین بزند. سپس با دنبال نمودن این راستا تا زمانیکه تغییری حاصل نشده، بعنوان مثال رسیدن به حصار، حرکت خود را ادامه می‌دهد. اما اگر حین حرکت تغییری ایجاد گردید کودک بار دیگر با برداشتن دو گام کوچک همانند نقطه شروع، راستای جدیدی را برای ادامه حرکتش بدست می‌آورد که او را داخل محدوده حصار نگه داشته و به سمت بالای تپه راهنمایی نماید. این روند تا رسیدن کودک به بالای تپه ادامه می‌یابد. این روند دو مرحله‌ای تکرار شونده برای یافتن بهینه را می‌توان به زبان ریاضی بصورت زیر نوشت:

$$x^q = x^{q-1} + \alpha^* S^q \quad (۳-۲) [۶۲]$$

در رابطه (۳-۲) x^q مقدار متغیر در تکرار شماره q می‌باشد. که گام نخست، استفاده از اطلاعات گرادیان جهت یافتن راستای جستجوی S برای حرکت در آن می‌باشد. گام دوم حرکت در راستای یافته شده می‌باشد تا زمانی که تغییری حاصل گردد. به این گام، جستجوی خط^۱ یا جستجوی یک بُعدی^۲ گفته می‌شود که اندازه گام بهینه α^* را نیز فراهم می‌آورد. همچنین الگوریتم‌های بر اساس گرادیان بسیاری وجود دارند که به جستجوی خط وابسته نیستند.

¹ Line Search

² One dimensional Search

در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی اطلاعات گرادیان به راحتی در دسترس نیست و با استفاده از محاسبات گرادیان تفاضل محدود بدست می‌آید. گرادیان‌های تفاضل محدود راهی برای برآورد اطلاعات گرادیان فراهم می‌آورند اما این روش بسیار زمانبر بوده و فقط تقریبی از گرادیان بدست می‌آورد که از دقت لازم برخوردار نیست و به اندازه گام انتخاب شده وابسته است. در مقابل، روش مشتق‌گیری خودکار قرار دارد که در صورت دسترسی به کد اصلی، می‌توان از آن برای بدست آوردن اطلاعات گرادیان مورد نیاز با دقت مناسبی بهره برد.

برخی از شبیه‌سازی‌های عددی قادر به فراهم آوردن مستقیم اطلاعات گرادیان بصورت تحلیلی یا نیمه تحلیلی می‌باشند. برای مثال، روش‌های تحلیلی و نیمه تحلیلی در کدهای اجزای محدود خطی جهت بکارگیری در بهینه‌سازی سازه‌ها برای بدست آوردن اطلاعات گرادیان ارزان قیمت محاسباتی استفاده می‌گردند. بطور مشابه، روش‌های تحلیلی در کدهای محاسباتی دینامیک سیالات نیز بکار برده می‌شود. در کل، استفاده از برنامه‌های تحلیلی برای یافتن اطلاعات گرادیان مناسب‌تر بوده و علاوه بر دقت بالا و کارآمدی، هزینه محاسباتی کمتری نیز در پی دارد.

بر اساس سناریو مطرح شده، راس‌های جستجوی متفاوتی در رابطه (۲-۳) مورد نیاز می‌باشد. برای مسائل بهینه‌سازی نامقید یا مسائل مقید بدون قیدهای فعال یا برآورده نشده، هر راستای جستجویی که تابع هدف را بهبود بخشد مطلوب است و بعنوان راستای قابل استفاده در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۱-۳) بهینه‌سازی بر اساس گرادیان [۶۲]

برای مسائل بهینه‌سازی مقید با یک یا چند قید برآورده نشده، هر راستای جستجویی که قید برآورده نشده را برطرف کند مطلوب است. برای مسائل بهینه‌سازی مقید با یک یا چند قید فعال و بدون قید برآورده نشده، راستای جستجویی که هم قابل استفاده و هم شدنی باشد مورد نیاز است. راستای شدنی به هر راستایی گفته می‌شود که از کران‌های قید خارج نشود [۶۲].

تفاوت الگوریتم‌های بر اساس گرادیان بیشتر در منطق استفاده شده برای تعیین راستای جستجو می‌باشد. الگوریتم‌های فراوانی قادر به یافتن بهترین اندازه گام برای جستجوی خط می‌باشند و بطور کلی می‌توان با ترکیب هر کدام از این روش‌ها با یک الگوریتم بر اساس گرادیان مخصوص، جستجوی خط را اجرا نمود. برخی از الگوریتم‌های معروف این روش جستجوی بخش طلایی^۱، جستجوی فیبوناچی^۲ و بسیاری از تقریب‌های چند جمله‌ای می‌باشند.

با در دست داشتن اطلاعات گرادیان می‌توان از شرایط کیروش-کوهن-تاکر^۳ برای تعیین صحت بهینه محلی مقید یافته شده استفاده نمود. شرایط KKT شرط‌های لازم برای بهینه محلی را فراهم می‌آورد

¹ Golden Section Search

² Fibonacci Search

³ Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

و خلاصه‌ای از آن به شرح زیر است:

۱. نقطه طراحی بهینه، x^* باید شدنی باشد.

۲. گرادیان لاگرانژ در نقطه طراحی بهینه می‌بایست برابر صفر باشد

$$\nabla f(x^*) + \sum_{j=1}^m \lambda_j \nabla g_j(x^*) + \sum_{k=1}^p \lambda_{m+k} \nabla h_k(x^*) = 0 \quad (3-3)$$

که در آن ضرایب لاگرانژ $\lambda_j \geq 0$ بوده و λ_{m+k} بدون علامت می‌باشد. همچنین ∇g_j و

∇h_j بترتیب گرادیان شرط‌های نامساوی و گرادیان شرط‌های مساوی می‌باشد.

۳. برای هر قید نامساوی $\lambda_j g_j(x^*) = 0$ ، که در آن $j = 1, \dots, m$ می‌باشد.

در مسائل نامقید، شرایط KKT تنها لازم است گرادیان تابع هدف در نقطه طراحی بهینه برابر

صفر باشد. شرایط KKT صرفاً جهت تشخیص بهینه محلی مفید است نه برای آنکه نشان دهد

بهینه سراسری یافته شده است [۶۱].

۳-۲-۲- روش نیوتن

یکی از الگوریتم‌های کلاسیک بهینه‌سازی بر اساس گرادیان، الگوریتم نیوتن می‌باشد. این الگوریتم

نامقید است و از بسط مرتبه دوم سری تیلور تابع هدف حول نقطه طراحی اولیه x^0 بدست می‌آید.

$$f(x) \approx f(x^0) + \nabla f(x^0)^T (x - x^0) + \frac{1}{2} (x - x^0)^T H(x^0) (x - x^0) \quad (4-3)$$

که در آن $H(x^0)$ ماتریس هسیان است و شامل اطلاعات گرادیان مرتبه دوم تابع هدف می‌باشد. با

مشتق‌گیری بر حسب x از رابطه (۴-۳) و برابر با صفر قرار دادن آن طبق شرایط KKT، فرمول فوق

برای نقطه طراحی کنونی بصورت زیر می‌انجامد.

$$x = x^0 - H(x^0)^{-1} \nabla f(x^0) \quad (5-3)$$

در این قالب کلاسیک، روش نیوتن از اندازه گام ثابت برابر با یک (بدون نیاز به جستجوی خط) استفاده نموده و راستای جستجو توسط $-H(x^0)^{-1} \nabla f(x^0)$ فراهم شده است. روش نیوتن نرخ همگرایی کواتراتیک^۱ دارد بدین معنا که برای بدست آوردن بهینه هر تابع کواتراتیک اکیدا مثبت فقط به یک گام (با اندازه گام برابر یا یک) نیاز دارد. در عمل، این روش با دربرگرفتن جستجوی خط جهت بهبود کارآمدی و مقاوم بودن روش اصلاح گردیده.

اگرچه این روش دارای نرخ همگرایی کواتراتیک است که بسیار مطلوب می باشد اما هزینه محاسباتی بدست آوردن اطلاعات گرادیان مرتبه دوم در ماتریس هسیان، این روش را در بیشتر موارد غیرعملی می نماید. در نتیجه، بیشتر روش های بر اساس گرادیان تنها اطلاعات گرادیان مرتبه اول را بکار می برند [۶۱].

۳-۲-۳- بهینه سازی نامقید

روش های فلتچر ریوز^۲ و برویدن فلتچر گولدفارب شانو^۳ برای حل مسائل نامقید بسیار شناخته شده می باشند. روش فلتچر ریوز با استفاده از مزدوج راستاهای جستجو (که برگرفته از روش گرادیان مزدوج می باشد) به بهینه می رسد. راستاهای مزدوج جستجو با استفاده از اطلاعات گرادیان تکرار قبلی طراحی بدست می آیند. این روش به خوبی قادر به کمینه نمودن یک تابع کواتراتیک در n تکرار یا کمتر از آن بوده و به حافظه بسیار کمی در کامپیوتر نیاز دارد.

¹ Quadratic

² Fletcher-Reeves

³ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)

بر اساس آزمون‌های عددی، BFGS کاربردی‌ترین روش از خانواده روش‌های متغیر متریک^۱ می‌باشد که برای یافتن راستای جدید جستجو، اطلاعات n تکرار قبل را بکار می‌برند. روش BFGS تقریبی از معکوس ماتریس هسیان $H(x^0)^{-1}$ در رابطه (۳-۵) ایجاد می‌کند. این تقریب در هر تکرار با اطلاعات گرادیان مرتبه اول همان تکرار به‌روز رسانی می‌گردد. اگر برای معکوس ماتریس هسیان فقط یک تقریب زده شود، به آن روش شبه نیوتن گفته می‌شود. از نظر ریاضی روش BFGS به روش فلتچر ریوز برتری دارد اما نیاز آن به حافظه بیشتر برای ذخیره‌سازی تقریب معکوس ماتریس هسیان، اشکال قابل ملاحظه‌ای است [۶۱].

۳-۲-۴- بهینه‌سازی مقید

برای مسائل مقید به بررسی دو رویکرد تکنیک‌های کمینه‌سازی متوالی نامقید^۲ و روش‌های مستقیم (یا مقید)^۳ می‌پردازیم. روش SUMT با استفاده از جریمه نمودن تابع هدف با هر یک از قیدهای مسئله، ابتدا مسئله مقید اصلی را به یک مسئله نامقید معادل تبدیل می‌نماید سپس این مسئله با هر کدام از الگوریتم‌های نامقید بحث شده در بالا، قابل حل می‌باشد. تابع هدف جریمه شده بصورت زیر است

$$f_p(x, r_p) = f(x) + r_p p(x) \quad [۶۱] (۶-۳)$$

که در آن $f_p(x)$ تابع هدف جریمه شده، r_p پارامتر جریمه و $p(x)$ تابع جریمه می‌باشد. در روش کلاسیک r_p ، برای تمام دوره کمینه‌سازی f_p ثابت نگه داشته می‌شود. در SUMT پس از آنکه بهینه نامقید پیدا شد، مقدار پارامتر جریمه r_p افزایش می‌یابد و دوره بهینه‌سازی نامقید تکرار

¹ Metric

² Sequential Unconstrained Minimization Techniques (SUMT)

³ Direct (or constrained) methods

می‌گردد. نتیجه بصورت پی در پی به بهینه مقید می‌گراید. این روند تا زمانی که مقدار تابع هدف بین دوره‌های موفقیت‌آمیز بهینه‌سازی نامقید همگرا شود، ادامه می‌یابد. توابع جریمه بسیار زیادی وجود دارند که یکی از آن‌ها، تابع جریمه کواراتیک بیرونی می‌باشد و بصورت زیر توصیف می‌گردد

$$p(x) = \sum_{j=1}^m \left(\max[0, g_j(x)] \right)^2 + \sum_{k=1}^l h_k(x)^2 \quad [61] \quad (7-3)$$

در رابطه (7-3)، $g_j(x)$ تابع قید نامساوی و $h_k(x)$ تابع قید مساوی را نمایش می‌دهند. تابع جریمه بیرونی به بهینه مقید در ناحیه نشدنی از فضای جستجو دست می‌یابد. اگرچه توابع جریمه درونی و جریمه درونی تعمیم یافته، بهینه مقید را در ناحیه شدنی فضای جستجو می‌یابند اما اشکالاتی نیز دارند که بزرگترین آن‌ها به مقدار پارامتر جریمه مربوط می‌شود. این پارامتر تاثیر قابل توجهی بر عملکرد الگوریتم دارد اما به مسئله وابسته است و گاهی برای دستیابی به نتایج مطلوب می‌بایست بسیار بزرگ قرار داده شود که به حساسیت عددی بالا می‌انجامد. روش ضریب لاگرانژ تکمیل شده با ایجاد تابع جریمه بر اساس لاگرانژ و توصیف پارامترهای جریمه بر اساس برآوردهای انجام شده از ضرایب لاگرانژ قادر است بر این محدودیت غلبه نماید؛ بعلاوه، این روش از مزیت دستیابی به برآورده ساختن دقیق قیدها برای یک مقدار محدود r_p برخوردار بوده و نسبت به مقدار r_p انتخاب شده نیز حساسیت کمتری دارد.

با کامل و کارآمد شدن روش‌های مستقیم (یا مقید) از محبوبیت روش‌های SUMT کاسته شد. مسائل بهینه‌سازی با مقیاس بسیار بزرگ (از نظر تعداد متغیرهای طراحی) حوزه بسیار جالبی است که در آن از روش‌های SUMT استفاده می‌گردد. بعنوان مثال، الگوریتم بیگ دات¹ برای حل مسائل بهینه‌سازی مقید با صدها هزار متغیر طراحی استفاده می‌شود. امروزه برای حل مسائل بهینه‌سازی مقید، روش‌های مستقیم از میان روش‌های بر اساس گرادیان انتخاب می‌شوند که به توضیح آن‌ها نیز

¹ BigDOT

خواهیم پرداخت.

روش‌های مستقیم، مسئله مقید غیرخطی رابطه (۳-۱) را بصورت مستقیم حل می‌نمایند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی مقید بسیار زیادی وجود دارند. سه الگوریتمی که در مهندسی رایج محسوب می‌شوند عبارتند از الگوریتم برنامه‌ریزی خطی متوالی^۱، الگوریتم روش اصلاح شده برای مسیرهای شدنی^۲ و الگوریتم برنامه‌ریزی مرتبه دوم متوالی^۳.

الگوریتم SLP با ایجاد تقریب‌های خطی از تابع هدف و قیدها حول نقطه طراحی کنونی، مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مقید اصلی را به مسئله خطی معادل ساده می‌نماید. با بکارگیری یک الگوریتم مناسب می‌توان حل بهینه را برای این تقریب‌های خطی یافت و نقطه طراحی نتیجه را مقدار دهی نمود. مجموعه جدیدی از تقریب‌های خطی حول این نقطه جدید ساخته شده و این روند تا همگرایی الگوریتم ادامه می‌یابد. این روش به محدودیت‌های حرکتی بسیار حساس بوده و ممکن است حل شدنی را همیشه پیدا ننماید. در نتیجه، بطور کلی این روش نسبت به الگوریتم‌های SQP و MMFD در رتبه پایین‌تری قرار می‌گیرد.

الگوریتم MMFD بر اساس روش اصلی، اصلاح شده الگوریتم راستاهای شدنی می‌باشد. این اصلاح، راستای جستجویی را فراهم می‌آورد که کران‌های قید فعال را (بیشتر از حرکت به داخل ناحیه شدنی) به سمت بهینه دنبال نماید. الگوریتم MMFD بسیار مقاوم بوده، فضای طراحی شدنی را با سرعت می‌یابد و در بهینه‌سازی سازه‌ها بطور وسیعی کاربرد دارد.

الگوریتم SQP تقریباً معروفترین الگوریتم در کاربردهای مهندسی می‌باشد. این الگوریتم یک راستای جستجو را با حل یک مسئله تقریب بر اساس تقریب کوادراتیک تابع هدف و تقریب‌های خطی توابع قیدها می‌یابد. پس از تعیین راستای جستجوی جدید، یک تابع جریمه برای یافتن اندازه گام در

¹ Sequential Linear Programming (SLP)

² Modified Method of Feasible Directions (MMFD)

³ Sequential Quadratic Programming (SQP)

راستای جستجوی بدست آمده بکار گرفته می‌شود. سپس نقطه طراحی جدید بدست آمده از ترکیب راستای جستجو و اندازه گام بهینه (با استفاده از رابطه (۳-۲)) بعنوان نقطه طراحی جدید مقدار دهی شده و این روند تا همگرایی الگوریتم ادامه می‌یابد. اگرچه یک تابع هدف برای اجرای جستجوی خط استفاده می‌شود؛ راه جالبی با استفاده از فرمول‌بندی دو تابعی برای جایگزینی جستجوی خط با یک فیلتر نیز وجود دارد.

روش‌های بر اساس گرادیان بسیار زیادی از جمله تصویر گرادیان^۱ و روش‌های گرادیان تعمیم یافته کاهشی^۲ نیز وجود دارند. این الگوریتم‌ها برای حل مسائل دنیای واقعی ایجاد شده‌اند که در آن مقداردهی توابع گران قیمت، نویزهای عددی، ناپیوستگی، مینیمم محلی، نواحی تعریف ناپذیر تابع در فضای جستجو و تعداد بسیار زیاد متغیرهای طراحی همگی مدنظر قرار گرفته‌اند [۶۱].

۳-۲-۵- روش‌های بدون گرادیان

مبحث روش‌های جستجوی محلی بدون ذکر وجود الگوریتم‌های بدون گرادیان تکمیل نخواهد شد. مثال‌های مشهور این دسته، روش پاول و الگوریتم سیمپلکس ندلر مید^۳ می‌باشد. هر دو الگوریتم با حل مسائل بهینه‌سازی نامقید غیرخطی سازگارند. روش پاول بر اساس مفهوم راستاهای مزدوج بوده در حالیکه الگوریتم ندلر مید با بکارگیری یک سیمپلکس و مجموعه‌ای از قوانین ساده به بدترین رأس در مرکز ثقل سیمپلکس دست پیدا می‌کند. در کل، روش‌های کلاسیک در بسیاری از مسایل از قبیل حل معادلات و دستگاه معادلات غیرخطی و معادلات دیفرانسیل، تنها گزینه عملی می‌باشد. طبیعی است که این روش‌ها برای حل مسایل بهینه‌سازی نیز به کار بروند.

روش‌های کلاسیک برای حل مسایل بهینه‌سازی، نیاز به یک حدس اولیه دارند و سپس این حدس را

¹ Gradient Projection

² Generalized Reduced Gradient

³ Nelder-Mead

با تکرارهای متوالی مدام بهبود می‌دهند تا به اندازه کافی به یک جواب مسئله نزدیک گردد. به عبارت دقیق‌تر، روش‌های کلاسیک بر مبنای حدس اولیه، دنباله‌ای را می‌سازند که این دنباله به یک جواب مسئله همگرا می‌گردد. تفاوت روش‌های کلاسیک در نحوه ایجاد و ساختن دنباله است. آن روش کلاسیکی مناسب است که دنباله‌ای بسازد که با سرعت بیشتری به جواب همگرا شود.

همچنین گاهی یک روش کلاسیک به ازای یک حدس اولیه همگرا و به ازای حدس اولیه دیگری واگرا می‌گردد. این نکته یکی از ضعف‌های اصلی روش‌های کلاسیک می‌باشد، چرا که یافتن حدس اولیه‌ای که به ازای آن‌ها روش همگرا شود، به آسانی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

از جمله خصوصیات روش‌های کلاسیک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- روش‌های کلاسیک موضعی می‌باشند و ممکن است به یک جواب موضعی همگرا شوند که سراسری نباشد. البته در مسایل محدب این روش‌ها سراسری‌اند و همچنین از همگرایی خوبی برخوردارند.

- اکثر روش‌های کلاسیک گرادیان محور می‌باشند و از اطلاعات گرادیان و یا هسیان استفاده می‌کنند. البته اغلب در روش‌های کلاسیک گرادیان و هسیان بصورت عددی تقریب زده می‌شوند.

- روش‌های کلاسیک عموماً برای مسایل گسسته قابل استفاده نمی‌باشند.

- در حالت کلی، عملکرد روش‌های کلاسیک به حدس اولیه وابسته می‌باشد. این روش‌ها ممکن است به ازای حدس‌های اولیه نامناسب همگرا نشوند.

- علی‌رغم ضعف‌های فوق، پیاده‌سازی کامپیوتری روش‌های کلاسیک سراسری و ساده می‌باشد. بطوریکه به دخالت انسان و محاسبات نمادین احتیاجی ندارند.

امروزه تنوع روش‌های کلاسیک بسیار زیاد می‌باشد، به طوری که ضعف‌های فوق را به حداقل رسانده و کم‌رنگ نموده است. به این لحاظ روش‌های کلاسیک از رایج‌ترین روش‌ها برای حل مسایل پیوسته می‌باشند [۶۱].

۳-۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری

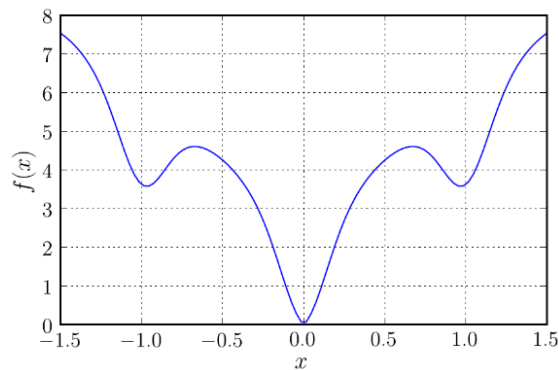
روش‌های کلاسیک دارای دو ضعف اساسی می‌باشند که عبارتند از موضعی بودن و عدم قابلیت اعمال روی مسائل گسسته. بسیاری از مسائل مینیمم‌های چندگانه، با تابعی یک متغیره دارند. شکل (۳-۲) در $x \approx \pm 1$ مینیمم محلی و در $x = 0$ مینیمم سراسری را نشان می‌دهند. هر سه نقطه مذکور شرایط KKT را برآورده نموده و هر الگوریتم کلاسیکی بسته به نقطه شروع، می‌تواند به یکی از این نقاط همگرا شود. برای مقابله با مینیمم‌های محلی چندگانه در فضای طراحی می‌توان از رویکرد شروع چندتایی استفاده نمود؛ در این رویکرد جستجوهای محلی چندگانه انجام می‌شوند که هر کدام از نقطه متفاوتی شروع می‌نمایند. رویکرد طراحی آزمون^۱ برای تولید مجموعه نقاط شروع بکار گرفته می‌شود.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری نسبت به الگوریتم‌های محلی که تا کنون توضیح داده شده، شانس بیشتری در یافتن بهینه سراسری و یا نقاط نزدیک آن را دارند. در کل، هیچ الگوریتمی قادر به تضمین نمودن همگرایی به بهینه سراسری نیست و صرفاً این الگوریتم‌ها به ویژگی توابع در بهینه سراسری دست پیدا می‌کنند. برای رفع ضعف‌های مذکور روش‌های متفاوتی ارائه گردیده است که در دو دهه اخیر، با بالا رفتن قدرت و سرعت کامپیوترها، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶۱].

یکی از موضوعات اصلی در توسعه الگوریتم‌ها، طراحی مدل‌های الگوریتمی برای حل مسائلی با پیچیدگی در حال افزایش می‌باشد. موفقیت‌های بزرگی در زمینه مدلسازی هوش طبیعی و زیستی بدست آمده که به سیستم‌های هوشمند می‌انجامد. این الگوریتم‌های هوشمند شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، محاسبات تکاملی، هوش جمعی، سیستم‌های ایمنی مصنوعی و سیستم‌های فازی می‌باشند. دنیایی که در آن زندگی می‌کنیم پیوسته در حال تغییر است. به منظور بقا در محیطی با تغییرات پویا، اشخاص می‌بایست توانایی تطبیق داشته باشند.

تکامل همان روند تطبیق با هدف بهبود توانایی‌های بقا در طول روندهایی همچون انتخاب طبیعی،

¹ Design of Experiments (DOE)



شکل (۲-۳) تابع چند کیفیتی یک بعدی

بقای مناسب‌ترین، تولید نسل، جهش، رقابت و همزیستی می‌باشد. محاسبات تکاملی روندهای تکامل طبیعی را مدلسازی می‌نماید. الگوریتم‌های تکاملی بسیار زیادی ایجاد شده‌اند [۶۳]. این دسته از الگوریتم‌ها از طبیعت و یا نحوه تکامل موجودات زنده الهام گرفته‌اند. از مشخصه‌های این الگوریتم‌ها می‌توان موارد زیر را برشمرد:

- معمولاً به فرضیاتی روی مسئله از قبیل مشتق پذیری، محدب بودن و غیره نیاز ندارند. بنابراین این روش‌ها را می‌توان روی طیف وسیعی از مسایل اعمال نمود.
- عموماً، روش‌های مدرن سراسری و بدون مشتق می‌باشند.
- این روش‌ها برای مسایل پیوسته و گسسته قابل استفاده می‌باشند. اصولاً این روش‌ها برای مسایل گسسته، مناسب‌تر می‌باشند.
- معمولاً هیچ پشتوانه مبتنی بر ریاضی برای عملکرد و همگرایی این روش‌ها به جواب بهینه وجود ندارد. اما در عمل همگرایی خود را نشان داده‌اند.

در این پایان نامه از سه الگوریتم ژنتیک، تجمع ذرات و گروه جستجو استفاده شده که در این فصل بعثت شهرت فراوان الگوریتم‌های ژنتیک و تجمع ذرات از توضیح آن‌ها صرف نظر و فقط به توضیح الگوریتم گروه جستجو پرداخته شده است. می‌توانید برای مطالعه الگوریتم ژنتیک به [۶۴] و الگوریتم

تجمع ذرات به [۶۵] مراجعه فرمائید.

۳-۳-۱- الگوریتم گروه جستجو

الگوریتم گروه جستجو به تازگی در [۶۶] منتشر شده است. ایده اصلی این الگوریتم آن است که در تکرارهای آغازین، تلاش الگوریتم بر یافتن ناحیه‌هایی متمرکز است که در آن‌ها نشانه‌هایی برای رسیدن به بهینه وجود دارد (قابلیت اطمینان)؛ با گذشت تکرارها، الگوریتم به بهترین طراحی در نواحی نوید دهنده نزدیک می‌شود (کارآمدی). این رویه را ثابت آشفتگی α کنترل می‌نماید. الگوریتم پیشنهاد شده شامل دو فاز می‌باشد: فاز سراسری و فاز محلی. بعلاوه، برای افزایش قابلیت اطمینان (توانایی جستجو) در این الگوریتم، عملگر جهش نیز بکار گرفته شده است و تعدادی از اعضای جمعیت که گروه جستجو نامیده می‌شوند نیز اعضای جدیدی تولید می‌نمایند. بنابراین، گام‌های کلی این الگوریتم بعبارت زیر است:

- تولید جمعیت اولیه P .
- مقدار دهی تابع هدف برای هر یک از اعضا.
- انتخاب تعدادی از اعضای P با استفاده از انتخاب مسابقه‌ای^۱ برای تولید گروه جستجوی اولیه R .
- اعمال جهش بر گروه جستجو R ، توسط جایگزینی اعضای جدید تولید شده با اعضای منتخب انتخاب مسابقه‌ای معکوس.
- تولید خانواده با ایجاد آشفتگی در اعضای هر گروه جستجو. لازم بذکر است که اندازه آشفتگی توسط پارامتر α کنترل شده و این پارامتر در هر تکرار کاهش می‌یابد تا تعادل میان قابلیت اطمینان و کارآمدی الگوریتم حفظ گردد.
- پایان فاز سراسری و شروع فاز محلی با انتخاب گروه جستجو جدید از میان بهترین عضو هر

¹ Tournament Selection

خانواده بین تمام خانواده‌ها.

در الگوریتم گروه جستجو، جمعیت اولیه از طریق رابطه زیر تولید می‌شود

$$P_{ij} = x_j^{\min} + (x_j^{\max} - x_j^{\min})U [0,1], \quad (8-3)$$

$j = 1 \text{ to } n, i=1 \text{ to } n_{pop}.$

در رابطه فوق P_{ij} متغیر j ام عضو i ام جمعیت P بوده و x_j^{\max} ، x_j^{\min} ، n ، n_{pop} به ترتیب کران‌های پایین و بالای متغیر طراحی j ام، تعداد متغیرهای طراحی و اندازه جمعیت می‌باشد. همچنین، $U [0,1]$ عددی تصادفی در بازه $[0-1]$ با توزیع یکنواخت است.

پس از تولید جمعیت اولیه و مقدار دهی تابع هدف به ازای هر عضو، گروه جستجوی اولیه با انتخاب n_g عضو از جمعیت P توسط انتخاب مسابقه‌ای استاندارد تشکیل می‌گردد. برای تمیز دادن بهترین و بدترین طراحی، پس از هر تکرار، اعضای گروه جستجو رتبه‌بندی می‌شوند.

همانطور که پیشتر گفته شد، گام بعدی جهش است. برای اعمال عملگر جهش، انتخاب مسابقه‌ای معکوس بکار گرفته شده تا مشخص کند کدام عضو با عضو جدید تولید شده جایگزین گردد. اعضای جدید با رابطه زیر تولید می‌شوند

$$x_j^{mut} = E [R_j] + t \varepsilon \sigma [R_j], \quad \text{for } j = 1 \text{ to } n. \quad (9-3)$$

در رابطه فوق x_j^{mut} عضو j ام جهش یافته است؛ E و σ به ترتیب عملگرهای میانگین و انحراف استاندارد بوده و R_j ستون j ام ماتریس گروه جستجو، ε پارامتر تصادفی و t پارامتر کنترل‌کننده طول همسایگی عضو جدید تولید شده می‌باشد. سپس برای تولید خانواده از رابطه زیر استفاده می‌گردد

$$x_j^{new} = R_{ij} + \alpha \varepsilon, \quad \text{for } j = 1 \text{ to } n. \quad (10-3)$$

در رابطه فوق برای کاهش مقدار α در هر تکرار k ، رابطه زیر بکار گرفته می‌شود

$$\alpha^{k+1} = b\alpha^k \quad (11-3)$$

که در آن b یکی از پارامترهای الگوریتم می‌باشد و از رابطه

$$b = \max \left(1 - \frac{4 * k}{it_{global}^{max}}, 0.25 - \frac{k}{it_{global}^{max}} \right) \quad (12-3)$$

محاسبه می‌گردد. اگرچه برای آنکه در فاز سراسری بتوان جستجوی خوبی در فضای طراحی انجام داد می‌بایست مقدار α به اندازه کافی بزرگ باشد. پس از آنکه تکرارهای الگوریتم به it_{global}^{max} رسید فاز سراری خاتمه یافته و از آن پس فاز محلی آغاز می‌گردد که در آن گروه جستجو با انتخاب بهترین عضو هر خانواده تشکیل می‌گردد.

فصل ۴:

ساختار کنترل و شبیه‌سازی

۴-۱ - مقدمه

با توجه به تاخیر موجود در شبکه روش‌های کنترلی می‌بایست علاوه بر حفظ پایداری سیستم بر کنترل و حفظ عملکرد مطلوب نیز متمرکز شوند. در این پایان‌نامه با توجه به سادگی پیاده‌سازی، کم هزینه بودن و فراوانی استفاده در صنعت، کنترل‌کننده PID و کنترل‌کننده PID فازی برای سیستم‌های کنترل تحت شبکه انتخاب شده است.

۴-۲ - کنترل‌کننده PID فازی

کنترل PI فازی نسبت به کنترل PD فازی کاربردی‌تر است زیرا حذف خطای حالت ماندگار در PD فازی مشکل می‌باشد. اما کنترل PI فازی نیز برای فرآیند مرتبه بالا بعلت انتگرال‌گیر داخلی در پاسخ گذرا عملکرد مطلوبی ندارد.

به منظور بهبود عملکرد این دو، کنترل‌کننده PID فازی در [۶۷] ارائه شده است. ساختار کنترل‌کننده PID فازی که کنترل‌کننده‌های PI فازی و PD فازی را بصورت موازی بهم متصل می‌نماید در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.

ورودی‌های کنترل‌کننده منطق فازی ضربی از خطا e و مشتق خطا \dot{e} بوده و خروجی سیگنال کنترل u_{FLC} است و ضرایب ورودی K_e , K_d و ضرایب خروجی α , β می‌باشند. خروجی نهایی این کنترل‌کننده بصورت رابطه (۴-۱) است.

$$u(t) = \alpha u_{FLC} + \beta \int u_{FLC} dt \quad (4-1)$$

در این پایان‌نامه در ساختار شکل (۴-۱) از موتور استنتاج مینیمم ممدانی، فازی‌ساز منفرد، غیرفازی‌ساز مرکز ثقل و توابع عضویت مثلثی برای کنترل‌کننده منطق فازی استفاده شده است، شکل (۴-۲). پایگاه قواعد فازی دو بُعدی کنترل‌کننده منطق فازی در جدول (۴-۱) و توابع عضویت مثلثی

استاندارد برای ورودیها و خروجی در شکل (۳-۴) نمایش داده شده است.

خروجی کنترل کننده منطق فازی

$$u_{FLC} = f(x_1, x_2) = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (۲-۴)$$

می باشد که در آن

$$\mu_{B'}(y) = \text{Max}_{l=1}^{49} \left(\text{Min}_{i=1}^2 \left(\mu_{A_i^l}(x_i) \mu_{B^l}(y) \right) \right) \quad (۳-۴)$$

و

$$\mu_{A_i^l}(x_i) = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - \bar{x}_i^l|}{b_i^l} & ; |x_i - \bar{x}_i^l| \leq b_i^l \\ 0 & ; |x_i - \bar{x}_i^l| > b_i^l \end{cases} \quad (۴-۴)$$

و

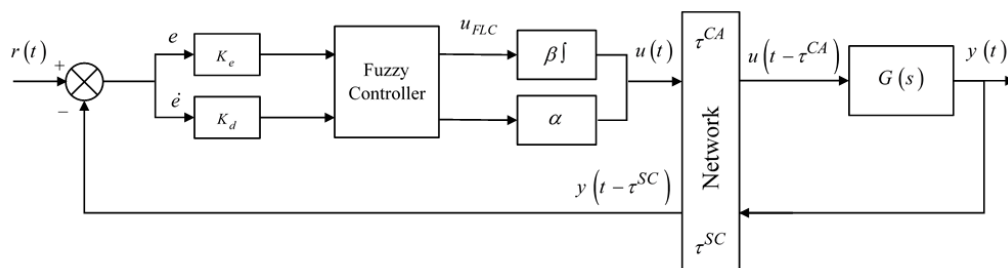
$$\mu_{B^l}(y) = \begin{cases} 1 - \frac{|y - \bar{y}^l|}{c^l} & ; |y - \bar{y}^l| \leq c^l \\ 0 & ; |y - \bar{y}^l| > c^l \end{cases} \quad (۵-۴)$$

است.

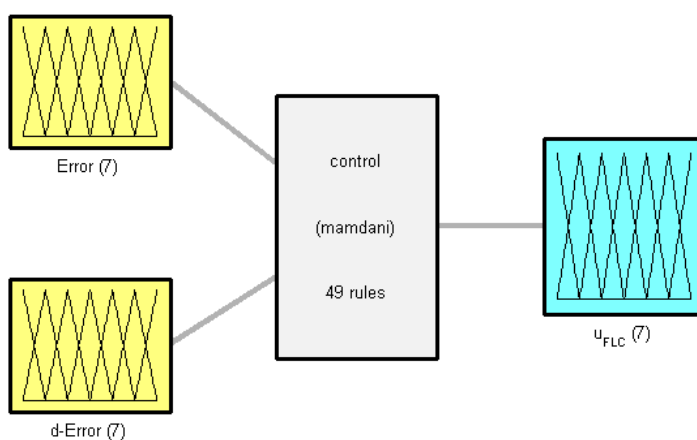
در رابطه (۲-۴) x_1 و x_2 ورودیها و $f(x_1, x_2)$ خروجی کنترل کننده منطق فازی بوده و در

رابطه های (۴-۴) و (۵-۴) مراکز توابع عضویت ورودیها \bar{x}_i^l و مراکز توابع عضویت خروجی \bar{y}^l

می باشند.



شکل (۱-۴) سیستم کنترل PID فازی



System control: 2 inputs, 1 outputs, 49 rules

شکل (۲-۴) کنترل کننده منطق فازی

با توجه به شکل (۳-۴)، می‌باشد. با استفاده از جدول (۱-۴) و شکل (۳-۴)، رابطه (۲-۴) بصورت زیر نوشته می‌شود،

$$\begin{aligned}
 f(x_1, x_2) = & \frac{25(w_7(x_1, x_2) - w_1(x_1, x_2))}{27(w_1(x_1, x_2) + w_7(x_1, x_2)) + 54 \sum_{k=2}^6 w_k(x_1, x_2)} + \\
 & \frac{36(w_6(x_1, x_2) - w_2(x_1, x_2))}{27(w_1(x_1, x_2) + w_7(x_1, x_2)) + 54 \sum_{k=2}^6 w_k(x_1, x_2)} + \\
 & \frac{18(w_5(x_1, x_2) - w_3(x_1, x_2))}{27(w_1(x_1, x_2) + w_7(x_1, x_2)) + 54 \sum_{k=2}^6 w_k(x_1, x_2)}
 \end{aligned} \tag{۶-۴}$$

$$w_1(x_1, x_2) = \text{Max} \left(\begin{array}{l} \text{Min}(\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^2}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^3}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^4}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^2}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^2}(x_1), \mu_{A_2^2}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^2}(x_1), \mu_{A_2^3}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^3}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^3}(x_1), \mu_{A_2^2}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^4}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2)) \end{array} \right) \quad (7-4)$$

$$w_2(x_1, x_2) = \text{Max} \left(\begin{array}{l} \text{Min}(\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^5}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^2}(x_1), \mu_{A_2^4}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^3}(x_1), \mu_{A_2^3}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^4}(x_1), \mu_{A_2^2}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^5}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2)) \end{array} \right) \quad (8-4)$$

$$w_3(x_1, x_2) = \text{Max} \left(\begin{array}{l} \text{Min}(\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^6}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^2}(x_1), \mu_{A_2^5}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^3}(x_1), \mu_{A_2^4}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^4}(x_1), \mu_{A_2^3}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^5}(x_1), \mu_{A_2^2}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^6}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2)) \end{array} \right) \quad (9-4)$$

$$w_4(x_1, x_2) = \text{Max} \left(\begin{array}{l} \text{Min}(\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^7}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^2}(x_1), \mu_{A_2^6}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^3}(x_1), \mu_{A_2^5}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^4}(x_1), \mu_{A_2^4}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^5}(x_1), \mu_{A_2^3}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^6}(x_1), \mu_{A_2^2}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^7}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2)) \end{array} \right) \quad (10-4)$$

$$w_5(x_1, x_2) = \text{Max} \left(\begin{array}{l} \text{Min}(\mu_{A_1^2}(x_1), \mu_{A_2^7}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^3}(x_1), \mu_{A_2^6}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^4}(x_1), \mu_{A_2^5}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^5}(x_1), \mu_{A_2^4}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^6}(x_1), \mu_{A_2^3}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^7}(x_1), \mu_{A_2^2}(x_2)) \end{array} \right) \quad (11-4)$$

$$w_6(x_1, x_2) = \text{Max} \left(\begin{array}{l} \text{Min}(\mu_{A_1^3}(x_1), \mu_{A_2^7}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^4}(x_1), \mu_{A_2^6}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^5}(x_1), \mu_{A_2^5}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^6}(x_1), \mu_{A_2^4}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^7}(x_1), \mu_{A_2^3}(x_2)) \end{array} \right) \quad (12-4)$$

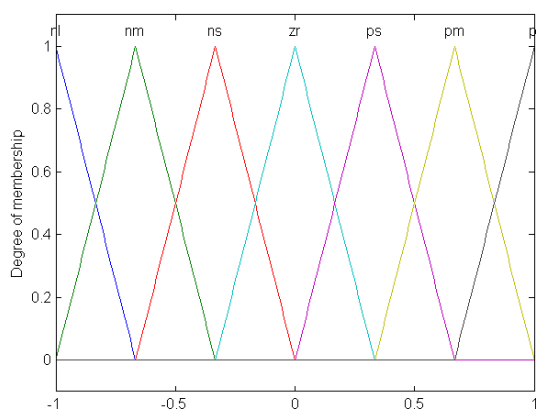
$$w_7(x_1, x_2) = \text{Max} \left(\begin{array}{l} \text{Min}(\mu_{A_1^4}(x_1), \mu_{A_2^7}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^5}(x_1), \mu_{A_2^6}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^5}(x_1), \mu_{A_2^7}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^6}(x_1), \mu_{A_2^5}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^6}(x_1), \mu_{A_2^6}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^6}(x_1), \mu_{A_2^7}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^7}(x_1), \mu_{A_2^4}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^7}(x_1), \mu_{A_2^5}(x_2)), \text{Min}(\mu_{A_1^7}(x_1), \mu_{A_2^6}(x_2)), \\ \text{Min}(\mu_{A_1^7}(x_1), \mu_{A_2^7}(x_2)) \end{array} \right) \quad (13-4)$$

است.

در این فصل ضرایب کنترل کننده PID و کنترل کننده PID فازی و مراکز توابع عضویت کنترل کننده فازی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی که در فصل پیش نام برده شد بهینه گشته؛ سپس با بررسی و مقایسه عملکرد آن‌ها، کنترل کننده PID فازی با توجه به عملکرد مطلوبش پیشنهاد می‌گردد.

جدول (۴-۱) پایگاه قواعد برای ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده منطق فازی

x_1 x_2	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PL	ZR	ps	pm	pl	pl	pl	pl
PM	ns	ZR	ps	pm	pl	pl	pl
PS	nm	ns	ZR	ps	pm	pl	pl
ZR	nl	nm	ns	ZR	Ps	pm	pl
NS	nl	nl	nm	ns	ZR	ps	pm
NM	nl	nl	nl	nm	ns	ZR	ps
NL	nl	nl	nl	nl	nm	ns	ZR



شکل (۴-۳) توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده منطق فازی

۳-۴- شیب‌سازی

شاخص عملکرد کنترل‌کننده‌ها که توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، تجمع ذرات و گروه جستجو کمینه می‌گردد بصورت زیر انتخاب شده است.

$$J = \int_0^{\infty} [w_1 t |e(t)| + w_2 u^2(t)] dt = (w_1 \times ITAE) + (w_2 \times ISCO) \quad (۱۴-۴)$$

این شاخص مجموع انتگرال زمان در قدرمطلق خطا^۱ با انتگرال مجذور خروجی کنترل‌کننده^۲ می‌باشد و معیار بهینگی در حوزه زمان است که بعلت وجود ضریب زمان سبب تضمین بروز نوسانات کمتر به معنای زمان نشست سریع‌تر می‌شود چرا که با گذشت زمان، میزان جریمه خطا در تابع هدف بزرگتر می‌گردد؛ بعلاوه، وجود قدرمطلق خطا نیز موجب کاهش فراجهدش خواهد شد. همچنین وجود مجذور سیگنال کنترل سبب می‌گردد تا افزایش آن باعث اشباع عملگر در نتیجه ویندآپ انتگرال^۳ نشود که این ویژگی در شاخص‌های دیگر مانند انتگرال زمان در مجذور خطا^۴ یا انتگرال مجذور زمان در مجذور خطا^۵ برآورده نمی‌شود زیرا با اینکه نمای بالاتر موجب زمان خیز و زمان نشست سریعتر خواهد شد اما در تغییر ناگهانی نقطه تنظیم این معیارهای اکید، خروجی کنترل‌کننده را به شدت افزایش می‌دهند. در رابطه (۱۴-۴) w_1 و w_2 جهت تامین تعادل میان اثر خطا و سیگنال کنترل در نظر گرفته شده اند. در این بخش از پایان نامه اهمیت دو عامل مذکور یکسان فرض گردیده و هر دو ضریب وزنی برابر انتخاب شده‌اند؛ $w_1 = w_2$ است.

¹ Integral of Time-multiplied Absolute Error (ITAE)

² Integral of the Squared Controller Output (ISCO)

³ Integral windup

⁴ Integral of Time multiplied Squared Error (ITSE)

⁵ Integral of Squared Time multiplied Error Squared (ISTSE)

برای بررسی عملکرد کنترل کننده PID فازی بهینه، دو دستگاه

$$P_1(s) = \frac{1}{(s+1)^5} \quad (15-4)$$

و

$$P_2(s) = \frac{2(0.5s+1)e^{-0.1s}}{(s+1)(4s+1)} \quad (16-4)$$

در نظر گرفته شده و عملکرد آن با کنترل کننده PID معمولی بهینه بر مبنای ردیابی بهینه برای تغییر واحد در نقطه تنظیم علاوه بر کاهش اغتشاش بار واحد در حضور و عدم حضور تاخیر تصادفی در هر دو کانال رفت و برگشت شبکه مقایسه شده است. تاخیر تصادفی در کانال رفت و در کانال برگشت بصورت زیر مدل سازی شده است.

$$\tau^{CA} = U [0, 0.2]t \quad (17-4)$$

$$\tau^{SC} = U [0, 0.2]t \quad (18-4)$$

که در آن‌ها $U [0, 0.2]$ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0-0.2]$ می‌باشد. زمان نمونه برداری در این تحقیق $T_s = 0.01(\text{sec})$ در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۲- نتایج شبیه سازی بدون تاخیر

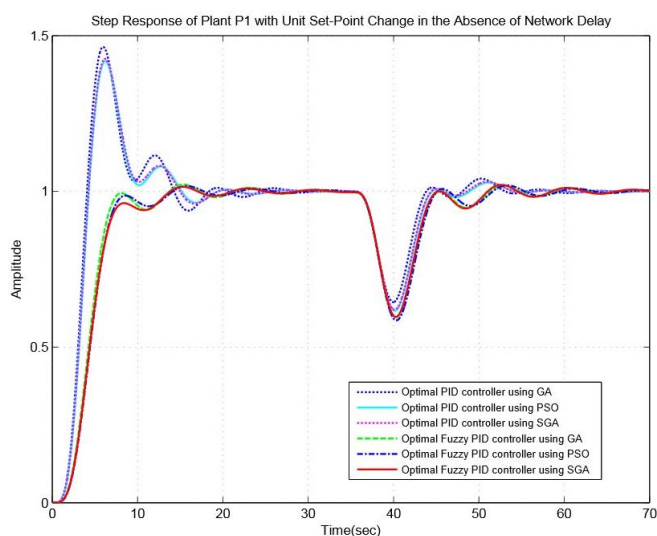
مقدار تابع هدف و ضرایب بهینه کنترل کننده PID در جدول (۴-۲) و کنترل کننده PID فازی استاندارد در جدول (۴-۳) برای هر دو دستگاه رابطه (۴-۱۵) و رابطه (۴-۱۶) نشان داده شده است. همچنین شکل های (۴-۴) تا (۴-۷) پاسخ سیستم‌ها به پله واحد و سیگنال خروجی کنترل کننده‌ها را نشان می‌دهند.

جدول (۲-۴) نتایج بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID معمولی بدون تاخیر

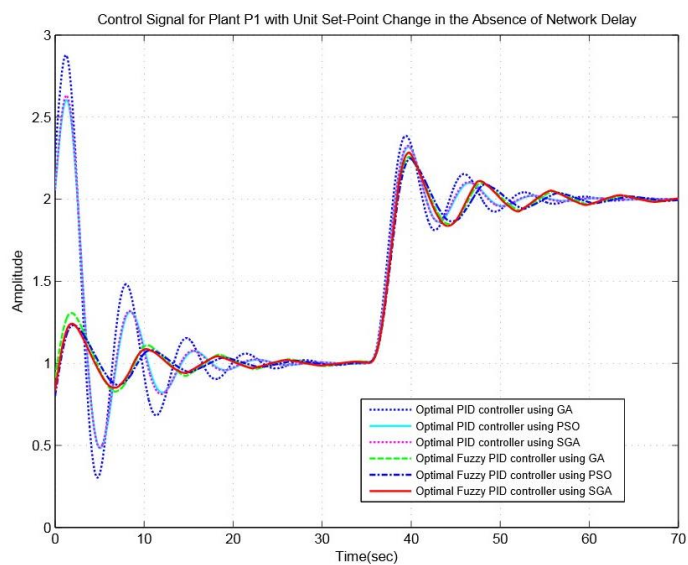
Plant	Method	Cost	Ke	Ki	Kd
P_1	GA	41.59832	2.258824	0.752941	3.764706
	PSO	41.43329	2.054244	0.63744	3.132168
	SGA	41.42169	2.062087	0.657844	3.228206
P_2	GA	16.34333	6.823529	4.862745	2.509804
	PSO	16.33629	6.737705	4.75454	2.29665
	SGA	16.33626	6.719684	4.742336	2.28681

جدول (۳-۴) نتایج بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID فازی استاندارد بدون تاخیر

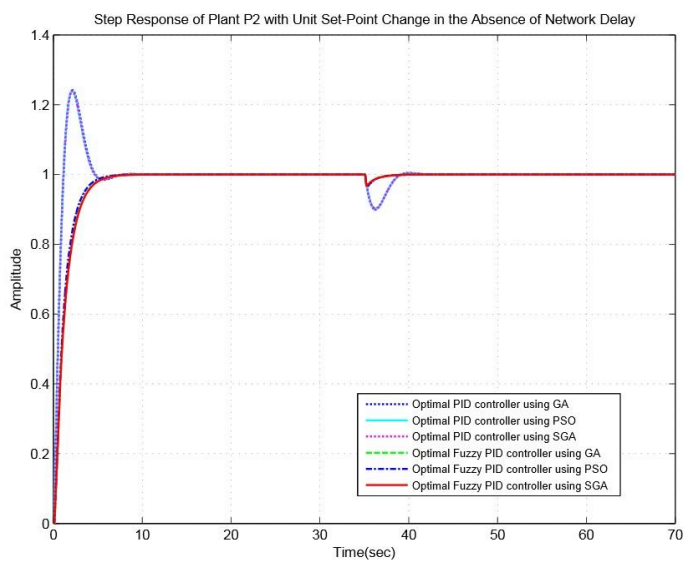
Plant	Method	Cost	Ke	Kd	β	α
P_1	GA	41.4399	0.196078	0.305882	1.854902	4.784314
	PSO	41.429	0.194968	0.330715	1.860528	4.219891
	SGA	41.3328	0.19289	0.354808	1.909993	4.42099
P_2	GA	12.24258	1.294118	1.647059	18.58824	1.411765
	PSO	12.24336	1.258884	1.479908	18.28626	1.609691
	SGA	12.22483	1.332991	1.712594	20.01805	1.259738



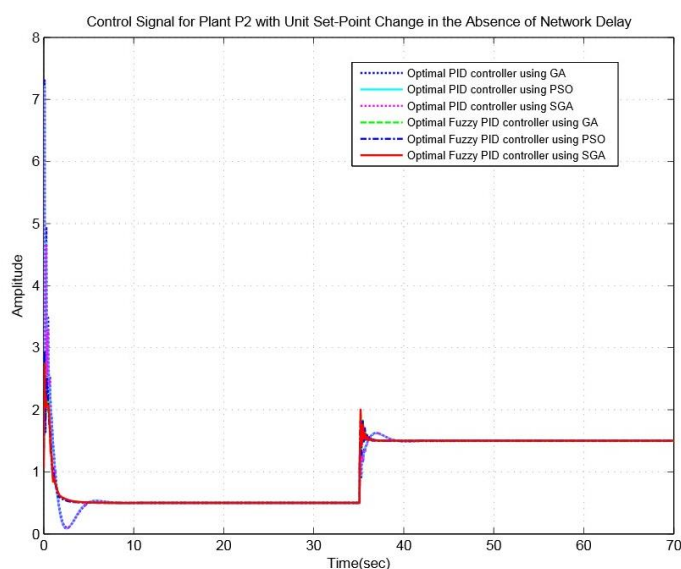
شکل (۴-۴) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر شبکه



شکل (۴-۵) سیگنال کنترل برای دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر شبکه



شکل (۴-۶) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر شبکه



شکل (۷-۴) سیگنال کنترل برای دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر شبکه

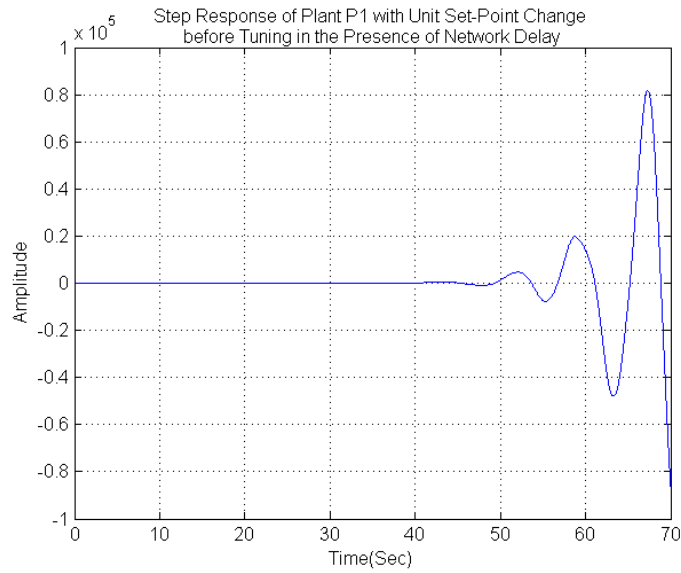
با توجه به نتایج فوق همانطور که انتظار می‌رفت کنترل‌کننده PID فازی استاندارد که ضرایب آن توسط الگوریتم گروه جستجو بهینه شده عملکرد بهتری در مقابل اغتشاش بار و تغییر واحد در نقطه تنظیم دارد. در بخش بعد عملکرد این کنترل‌کننده در حضور تاخیر تصادفی شبکه بررسی خواهد شد.

۴-۳-۳- نتایج شبیه‌سازی در حضور تاخیر تصادفی شبکه

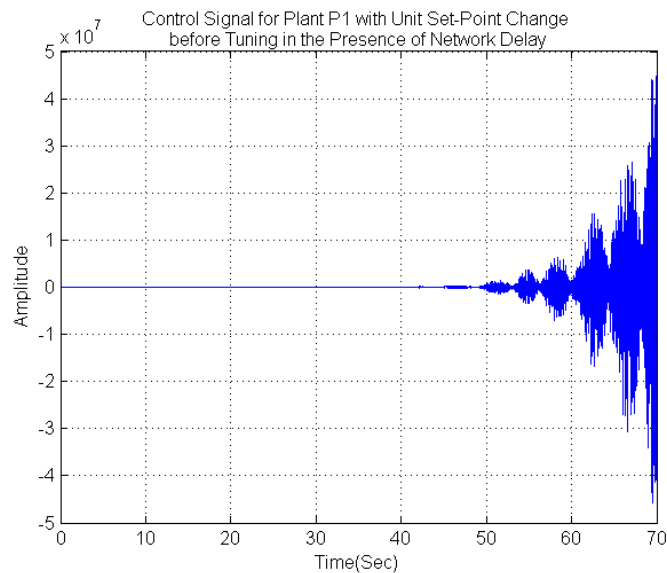
برای نشان دادن تاثیر مخرب تاخیر ابتدا پاسخ سیستم‌ها به پله واحد و سیگنال خروجی کنترل‌کننده‌ها در حضور تاخیر تصادفی پیش از تنظیم ضرایب برای هر دو دستگاه رابطه (۴-۱۵) و رابطه (۴-۱۶) در شکل‌های (۴-۸) تا (۴-۱۵) نشان داده شده است.

در این شکل‌ها بوضوح دیده می‌شود که هر دو دستگاه رابطه (۴-۱۵) و رابطه (۴-۱۶) با کنترل‌کننده PID ناپایدار است. همچنین کنترل‌کننده PID فازی با وجود آنکه ناپایدار نیست و در مقایسه با کنترل‌کننده PID عملکرد بهتری دارد اما پاسخ آن قابل قبول نمی‌باشد. بعلاوه، دامنه نوسانات سیگنال کنترل‌کننده PID رو به افزایش است و دامنه نوسانات سیگنال کنترل‌کننده PID فازی نیز

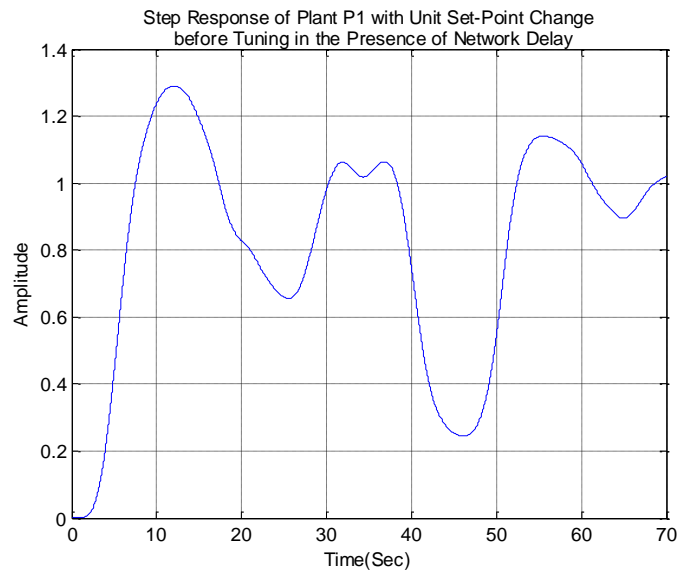
کاهش نیافته که ممکن است اثر مخربی بر عملگر داشته باشد.



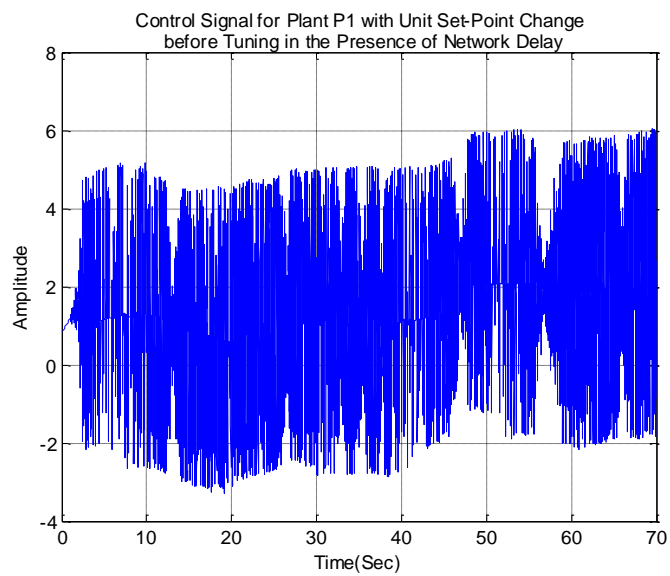
شکل (۸-۴) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID



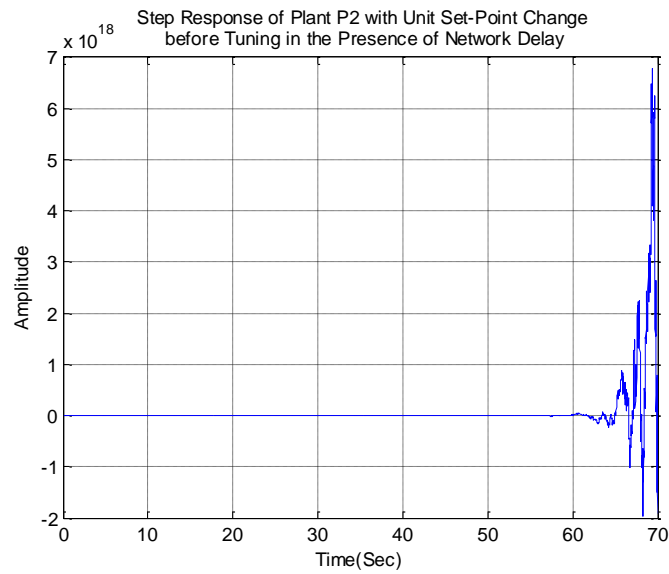
شکل (۹-۴) سیگنال کنترل برای دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID



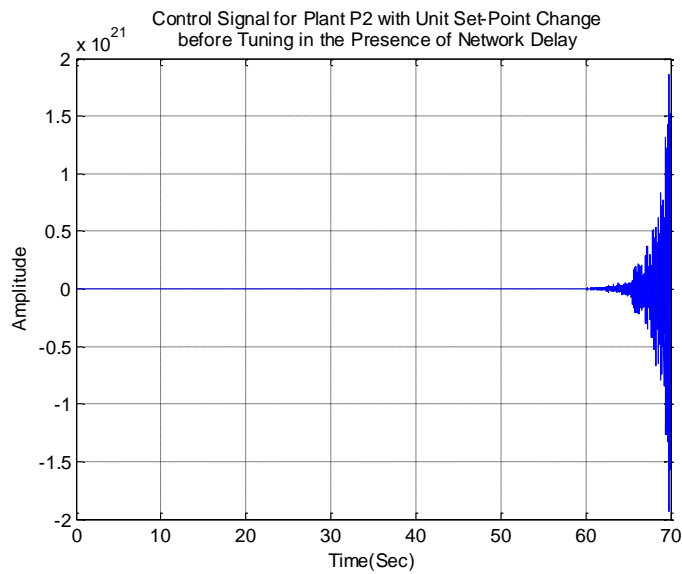
شکل (۴-۱۰) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID فازی



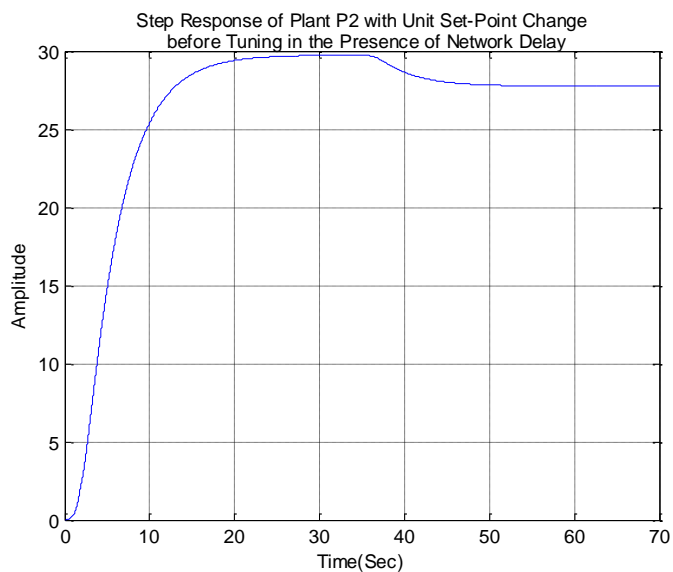
شکل (۴-۱۱) سیگنال کنترل برای دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID فازی



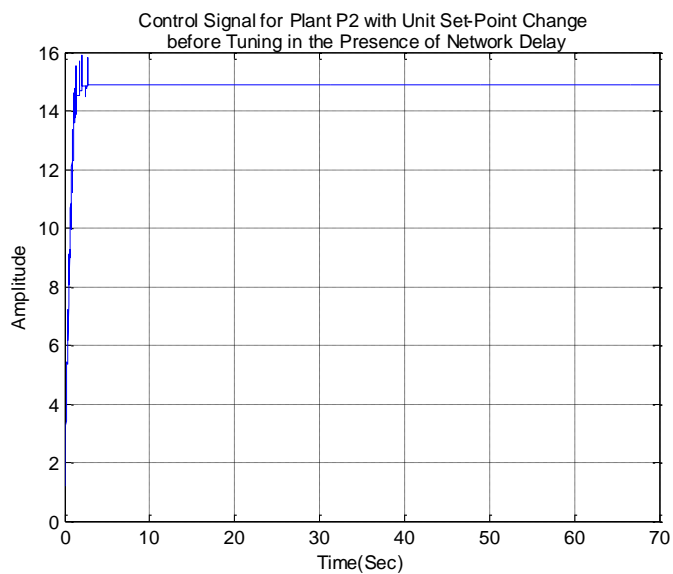
شکل (۴-۱۲) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID



شکل (۴-۱۳) سیگنال کنترل برای دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID



شکل (۴-۱۴) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID فازی



شکل (۴-۱۵) سیگنال کنترل برای دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر شبکه قبل از تنظیم ضرایب کنترل کننده PID فازی

مقدار تابع هدف و ضرایب بهینه کنترل کننده PID در جدول (۴-۴) و کنترل کننده PID فازی استاندارد در جدول (۴-۵) برای هر دو دستگاه رابطه (۴-۱۵) و رابطه (۴-۱۶) در حضور تاخیر

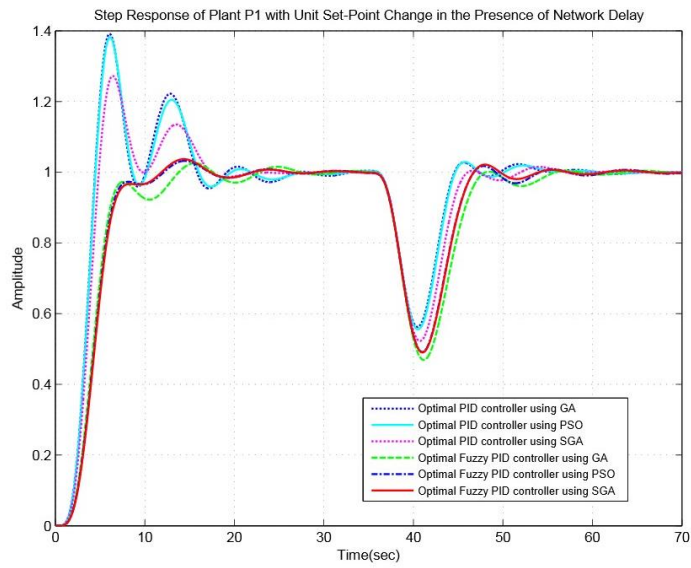
تصادفی شبکه نشان داده شده است. همچنین شکل‌های (۴-۱۶) تا (۴-۱۹) پاسخ سیستم‌ها به پله واحد و سیگنال خروجی کنترل‌کننده‌ها را نشان می‌دهند.

جدول (۴-۴) نتایج بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID معمولی در حضور تاخیر تصادفی شبکه

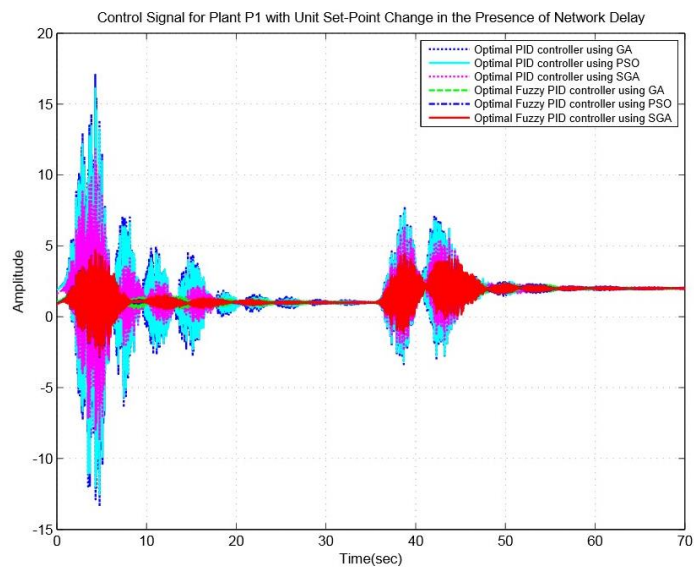
Plant	Method	Cost	Ke	Ki	Kd
P_1	GA	49.43083	1.898183	0.554452	1.916661
	PSO	48.7436	1.866257	0.53562	1.821403
	SGA	47.18767	1.617824	0.430043	1.450491
P_2	GA	18.2152	3.72549	2.039216	0.137255
	PSO	18.18391	3.947512	2.196745	0.198419
	SGA	18.18319	3.942344	2.175313	0.20647

جدول (۴-۵) نتایج بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID فازی استاندارد در حضور تاخیر تصادفی شبکه

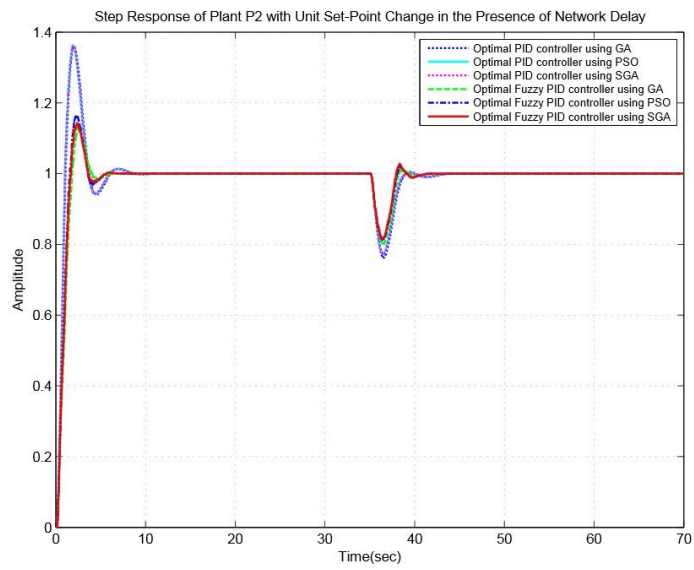
Plant	Method	Cost	Ke	Kd	β	α
P_1	GA	48.61226	0.298039	0.219608	0.996078	3.627451
	PSO	46.52198	0.195134	0.202446	1.579026	4.903177
	SGA	46.27652	0.187989	0.215238	1.707014	4.775559
P_2	GA	17.35872	1.313725	0.196078	2.431373	3.568627
	PSO	17.42703	1.310484	0.142925	2.389202	3.791201
	SGA	17.28218	1.329783	0.181955	2.789104	3.871239



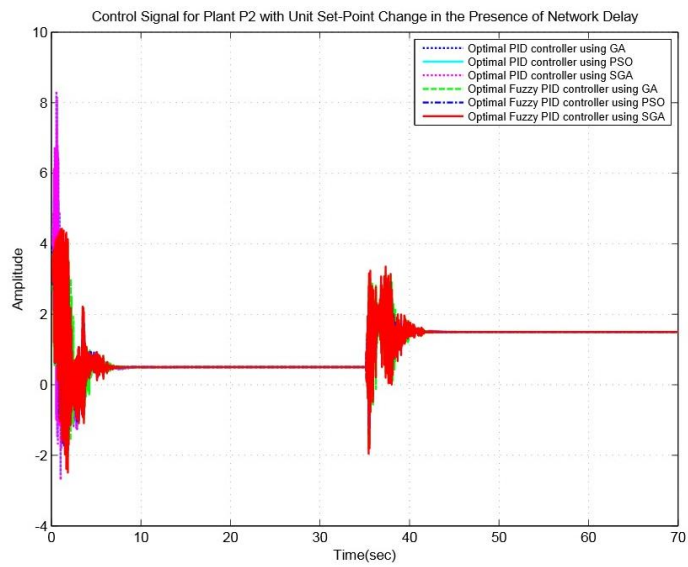
شکل (۴-۱۶) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه



شکل (۴-۱۷) سیگنال کنترل برای دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه



شکل (۴-۱۸) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه

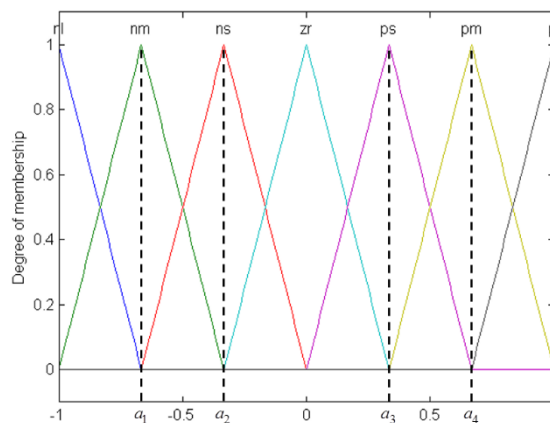


شکل (۴-۱۹) سیگنال کنترل برای دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه

با توجه به نتایج فوق همانطور که انتظار می‌رفت کنترل‌کننده PID فازی استاندارد که ضرایب آن توسط الگوریتم گروه جستجو بهینه شده عملکرد بهتری (حذف سریع‌تر اغتشاش بار و انحراف کمتر از نقطه تنظیم) در مقابل اغتشاش بار و تغییر واحد در نقطه تنظیم و نیز کاهش اثر تاخیر تصادفی شبکه دارد. همچنین دامنه نوسانات سیگنال کنترل در کنترل‌کننده PID فازی کمتر است.

در این بخش ضرایب بهینه برای کنترل هر دو دستگاه رابطه (۴-۱۵) و رابطه (۴-۱۶) بدست آمد؛ در بخش بعد با بکارگیری این ضرایب به بهینه‌سازی توابع عضویت در کنترل‌کننده PID فازی پرداخته شده بطوریکه کامل و سازگار باشند و سپس عملکرد این کنترل‌کننده با کنترل‌کننده PID فازی با توابع عضویت متقارن بدون تاخیر و در حضور تاخیر تصادفی بررسی و مقایسه خواهد شد.

شکل (۴-۲۰)، مراکز توابع عضویت ورودی اول کنترل‌کننده فازی $1, a_4, a_3, 0, a_2, a_1, -1$ را نشان می‌دهد. مراکز توابع عضویت ورودی دوم $1, b_4, b_3, 0, b_2, b_1, -1$ و خروجی $1, c_4, c_3, 0, c_2, c_1, -1$ نیز همانند ترتیب نشان داده شده در شکل می‌باشد.



شکل (۴-۲۰) مراکز توابع عضویت ورودی اول کنترل‌کننده فازی

مراکز توابع عضویت ورودی‌ها همراه با پارامتر وزن دهی w_1 توسط الگوریتم‌هایی بهینه شده‌اند که مورد بحث این تحقیق می‌باشند. این پارامتر برای ساخت توابع عضویت خروجی از روی توابع عضویت ورودی‌ها طبق رابطه (۱۹-۴) بکار رفته است.

$$c_i = \frac{w_1 a_i + (10 - w_2) b_i}{10}, \quad i = 1 \dots 4 \quad (19-4)$$

که در آن

$$w_2 = 10 - w_1 \quad (20-4)$$

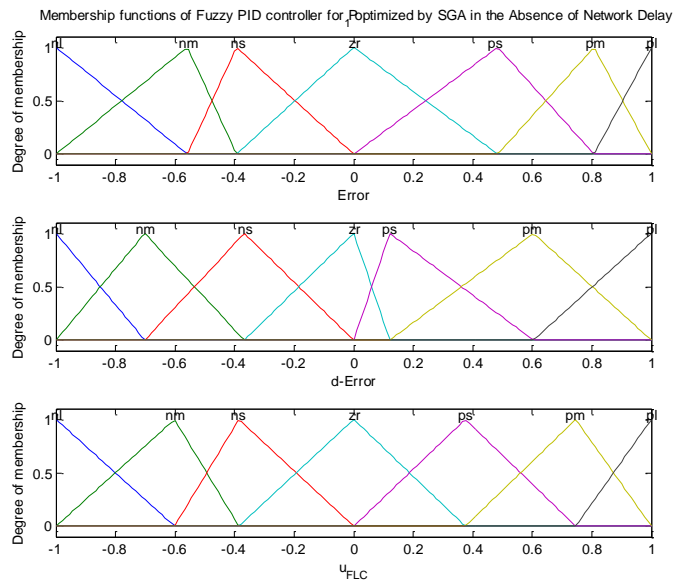
می‌باشد.

۴-۳-۴- نتایج بهینه‌سازی توابع عضویت در کنترل‌کننده PID فازی بدون تاخیر

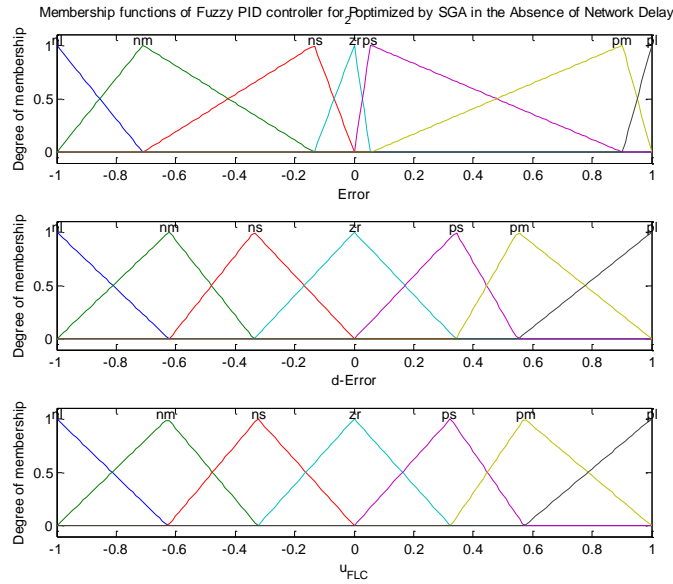
مقدار تابع هدف و مراکز بهینه توابع عضویت کنترل‌کننده PID فازی در جدول (۶-۴) برای هر دو دستگاه رابطه (۱۵-۴) و رابطه (۱۶-۴) نشان داده شده است. در شکل (۲۱-۴) و شکل (۲۲-۴) توابع عضویت ورودی‌های اول و دوم و خروجی بهترین کنترل‌کننده برای دو دستگاه تحت آزمایش، همچنین شکل‌های (۲۳-۴) تا (۲۶-۴) پاسخ سیستم‌ها به پله واحد و سیگنال خروجی کنترل‌کننده‌ها را نشان می‌دهند. در شکل‌های (۲۷-۴) تا (۳۰-۴) پاسخ سیستم‌ها به پله واحد و سیگنال خروجی بهترین کنترل‌کننده‌ها با توابع عضویت بهینه و استاندارد نمایش داده و مقایسه شده است.

جدول (۴-۶) نتایج بهینه‌سازی توابع عضویت کنترل‌کننده PID فازی بدون تاخیر در مقایسه با توابع عضویت استاندارد

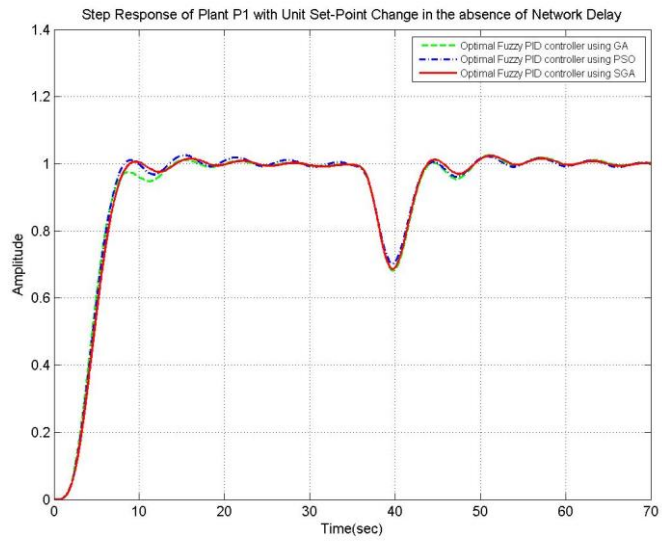
Plant	P_1				P_2			
	Without Optimization	GA	PSO	SGA	Without Optimization	GA	PSO	SGA
Cost	41.3328	38.18551	37.64349	37.59382	12.22483	12.02875	12.02305	12.01475
a_1	-0.6667	-0.72588	-0.75941	-0.55851	-0.6667	-0.69941	-0.58455	-0.71065
a_2	-0.3333	-0.40608	-0.37038	-0.39384	-0.3333	-0.16608	-0.2338	-0.13433
a_3	0.3333	0.431176	0.5	0.483988	0.3333	0.111765	0.053445	0.055302
a_4	0.6667	0.747647	0.800155	0.807132	0.6667	0.913922	0.784943	0.902158
b_1	-0.6667	-0.5	-0.53774	-0.70182	-0.6667	-0.62353	-0.6972	-0.62216
b_2	-0.3333	-0.34804	-0.45	-0.36792	-0.3333	-0.3998	-0.34832	-0.33668
b_3	0.3333	0.134706	0.124346	0.121288	0.3333	0.418824	0.412129	0.341917
b_4	0.6667	0.948431	0.794812	0.603581	0.6667	0.597059	0.585203	0.550128
w_1	1	8.589647	6.807285	7.000471	1	2.595647	2.615829	0.622137
w_2	1	1.410353	3.192715	2.999529	1	7.404353	7.384171	9.377863
c_1	-0.6667	-0.69402	-0.68864	-0.6015	-0.6667	-0.64323	-0.66773	-0.62767
c_2	-0.3333	-0.39789	-0.3958	-0.38606	-0.3333	-0.33914	-0.31836	-0.32409
c_3	0.3333	0.389364	0.380065	0.375195	0.3333	0.339122	0.318304	0.324085
c_4	0.6667	0.775965	0.798449	0.746076	0.6667	0.679305	0.637451	0.57203



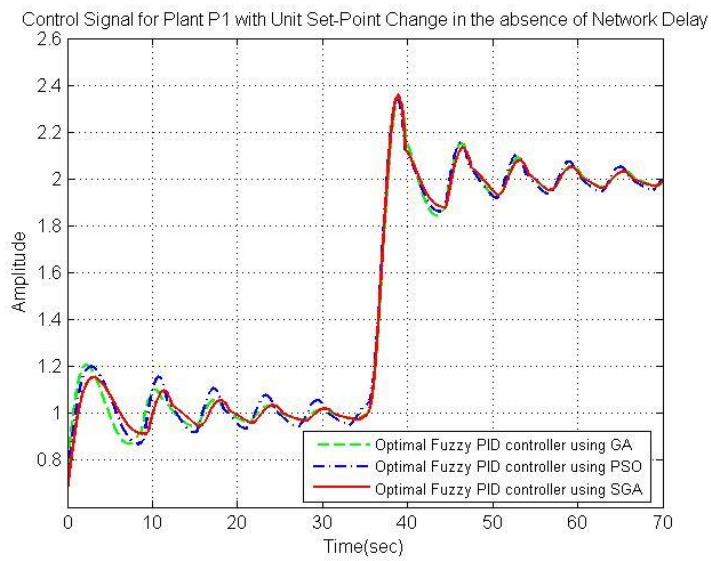
شکل (۴-۲۱) توابع عضویت بهینه نامتقارن کنترل کننده فازی برای P_1 بدون تاخیر



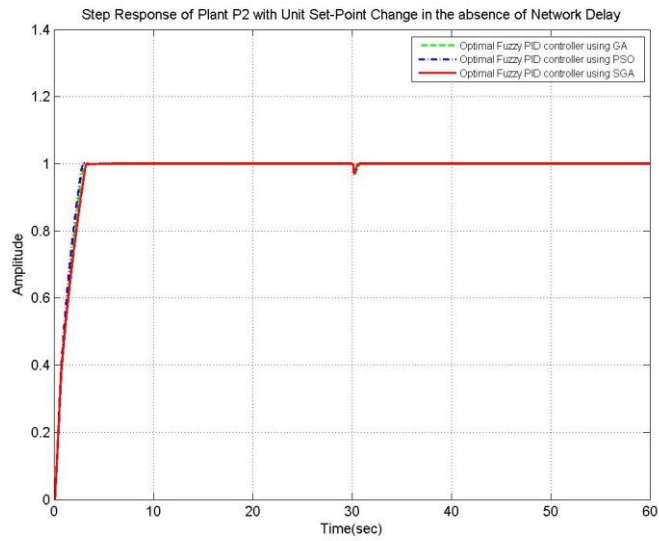
شکل (۴-۲۲) توابع عضویت بهینه نامتقارن کنترل کننده فازی برای P_2 بدون تاخیر



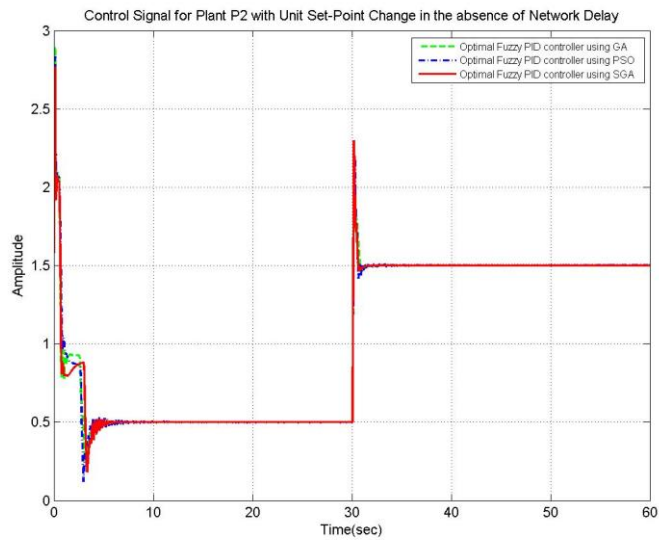
شکل (۴-۲۳) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه



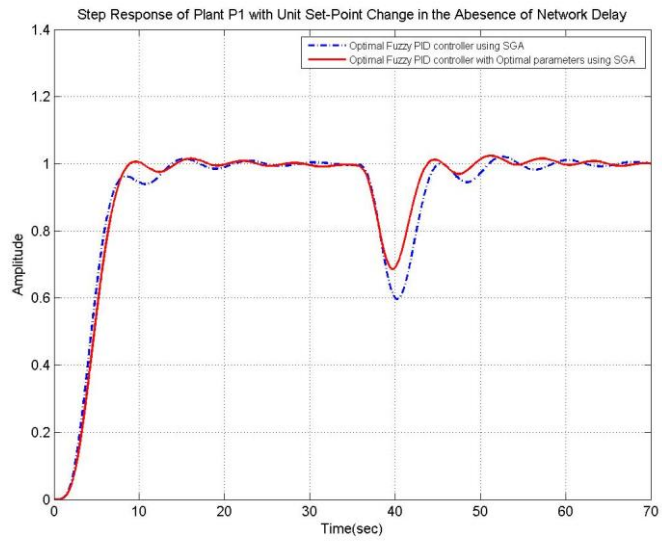
شکل (۴-۲۴) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه برای P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر



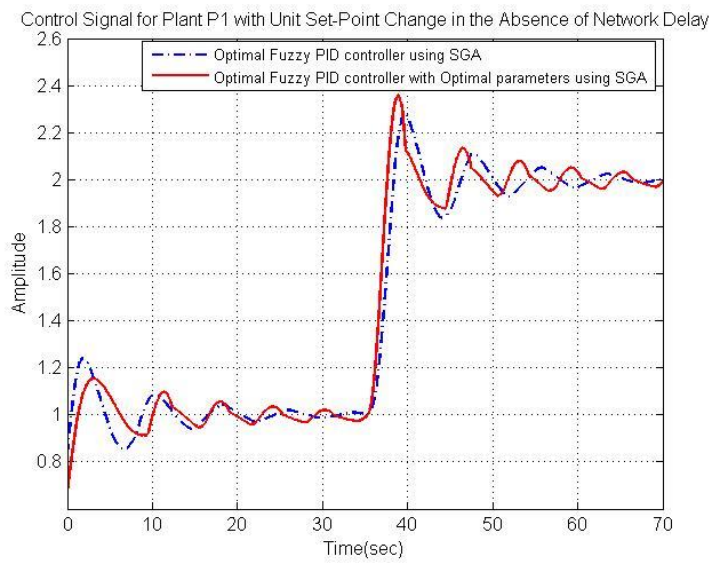
شکل (۴-۲۵) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه



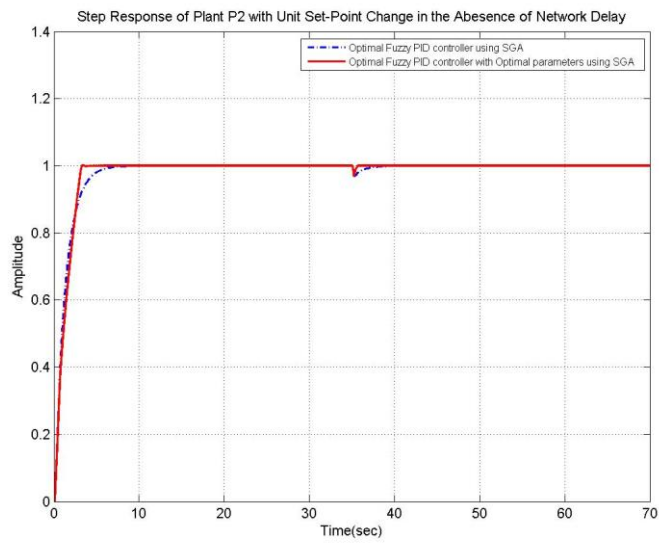
شکل (۴-۲۶) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه برای P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر



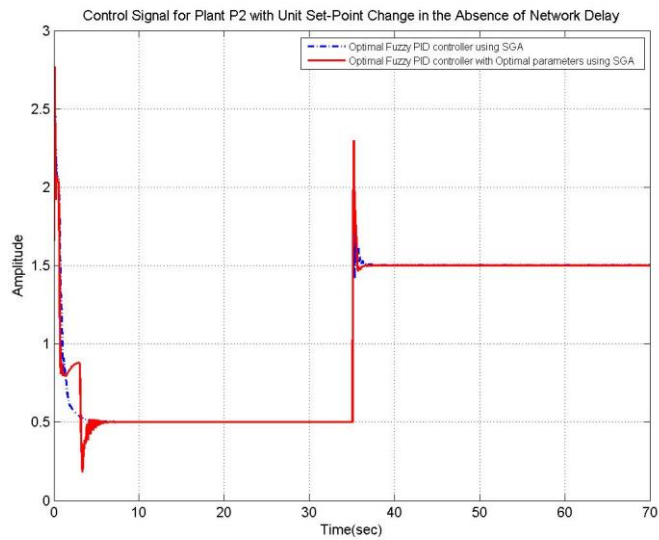
شکل (۴-۲۷) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد



شکل (۴-۲۸) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد برای P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر



شکل (۴-۲۹) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد



شکل (۴-۳۰) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد برای P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم بدون تاخیر

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۴-۲۳) تا (۴-۲۶) تاثیر چشمگیر بهینه‌سازی توابع

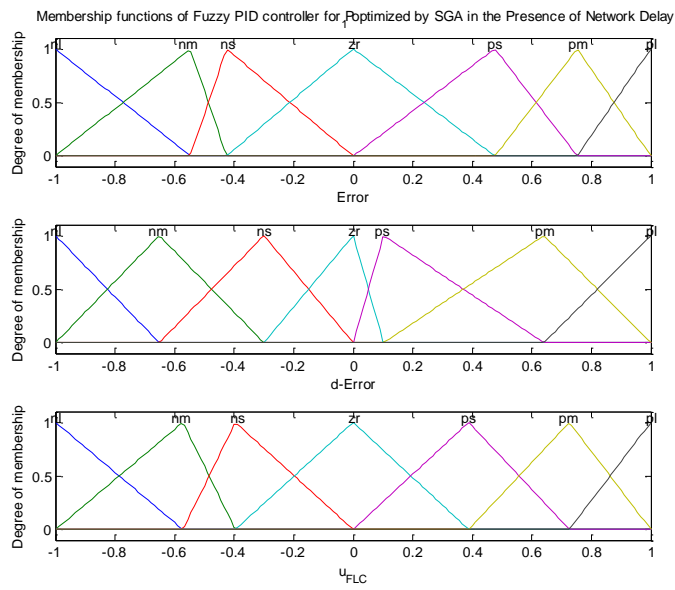
عضویت در کنترل کننده PID فازی بهینه که ضرایب و مراکز توابع عضویت آن توسط الگوریتم گروه جستجو بهینه شده باشد در عملکرد بهتر (حذف سریع تر اغتشاش بار و انحراف کمتر از نقطه تنظیم) مقابل اغتشاش بار و تغییر واحد در نقطه تنظیم مشاهده نمود. همچنین دامنه نوسانات سیگنال کنترل در این کنترل کننده کمتر است. در شکل های (۴-۲۷) تا (۴-۳۰) می توان تفاوت عملکرد و دامنه نوسانات خروجی کنترل کننده با توابع عضویت متقارن و با توابع عضویت بهینه نامتقارن را بوضوح ملاحظه نمود.

۴-۳-۵- نتایج بهینه سازی توابع عضویت در کنترل کننده PID فازی در حضور تاخیر تصادفی شبکه

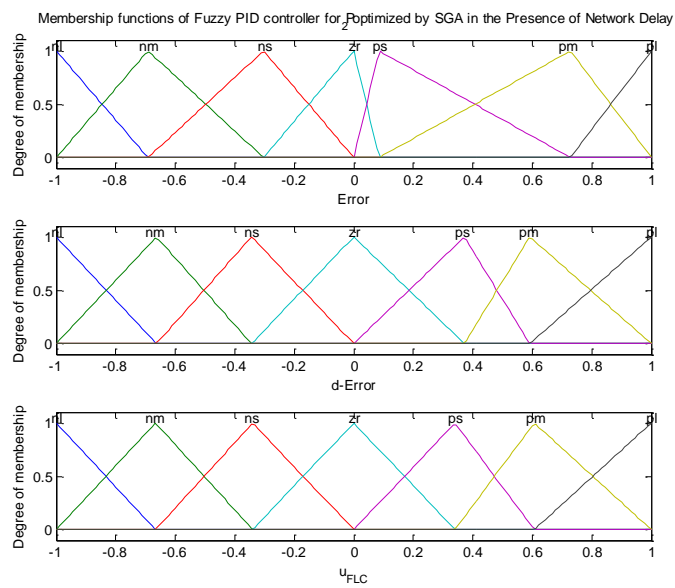
مقدار تابع هدف و مراکز بهینه توابع عضویت کنترل کننده PID فازی در حضور تاخیر تصادفی شبکه در جدول (۴-۷) برای هر دو دستگاه رابطه (۴-۱۵) و رابطه (۴-۱۶) نشان داده شده است. در شکل (۴-۳۱) و شکل (۴-۳۲) توابع عضویت ورودی های اول و دوم و خروجی بهترین کنترل کننده برای دو دستگاه تحت آزمایش، همچنین شکل های (۴-۳۳) تا (۴-۳۶) پاسخ سیستم ها به پله واحد و سیگنال خروجی کنترل کننده ها را نشان می دهند. در شکل های (۴-۳۷) تا (۴-۴۰) پاسخ سیستم ها به پله واحد و سیگنال خروجی بهترین کنترل کننده ها با توابع عضویت بهینه و استاندارد نمایش داده و مقایسه شده است.

جدول (۷-۴) نتایج بهینه‌سازی توابع عضویت کنترل‌کننده PID فازی در حضور تاخیر تصادفی شبکه در مقایسه با توابع عضویت استاندارد

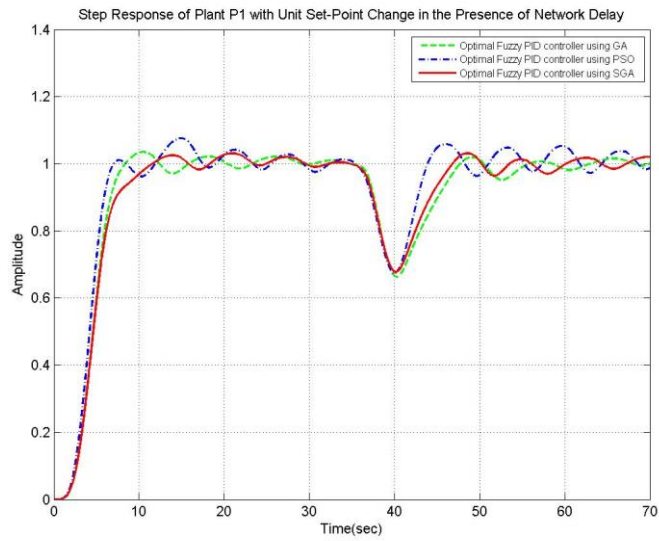
Plant	P_1				P_2			
	Without Optimization	GA	PSO	SGA	Without Optimization	GA	PSO	SGA
Cost	46.27652	40.06949	40.25966	38.90839	17.28218	17.01758	16.84062	16.77911
a_1	-0.6667	-0.50176	-0.67989	-0.54771	-0.6667	-0.77706	-0.73817	-0.69174
a_2	-0.3333	-0.32294	-0.39258	-0.42553	-0.3333	-0.19118	-0.37718	-0.30348
a_3	0.3333	0.425882	0.397261	0.475414	0.3333	0.164706	0.110805	0.084971
a_4	0.6667	0.670784	0.827614	0.752248	0.6667	0.75549	0.719932	0.728608
b_1	-0.6667	-0.61118	-0.70052	-0.65107	-0.6667	-0.59	-0.6313	-0.66326
b_2	-0.3333	-0.3951	-0.2911	-0.30044	-0.3333	-0.38569	-0.30811	-0.34411
b_3	0.3333	0.120588	0.087726	0.101396	0.3333	0.388824	0.358953	0.371451
b_4	0.6667	0.55	0.55	0.640073	0.6667	0.568824	0.572274	0.591252
w_1	1	7.257647	8.399799	7.641461	1	0.950235	1.629156	1.112303
w_2	1	2.742353	1.600201	2.358539	1	9.049765	8.370844	8.887697
c_1	-0.6667	-0.53177	-0.68319	-0.57209	-0.6667	-0.60777	-0.64871	-0.66643
c_2	-0.3333	-0.34273	-0.37634	-0.39603	-0.3333	-0.3672	-0.31936	-0.33959
c_3	0.3333	0.34216	0.347729	0.3872	0.3333	0.367527	0.318526	0.339585
c_4	0.6667	0.637661	0.783191	0.725791	0.6667	0.586561	0.59633	0.60653



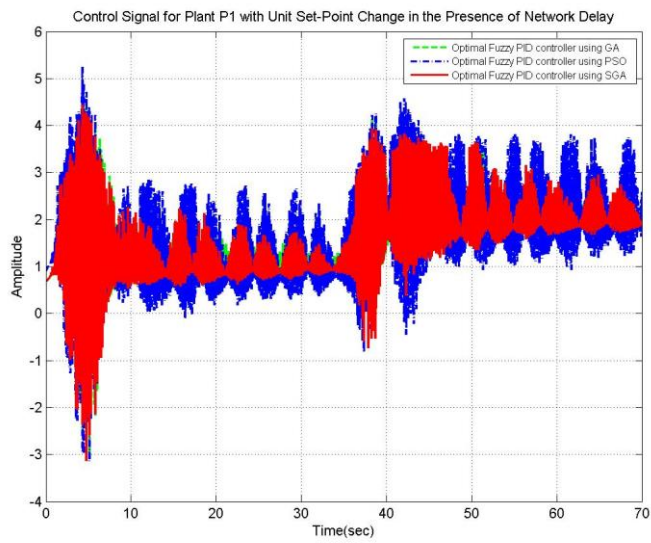
شکل (۴-۳۱) توابع عضویت بهینه کنترل کننده فازی برای P_1 در حضور تاخیر تصادفی شبکه



شکل (۴-۳۲) توابع عضویت بهینه کنترل کننده فازی برای P_2 در حضور تاخیر تصادفی شبکه



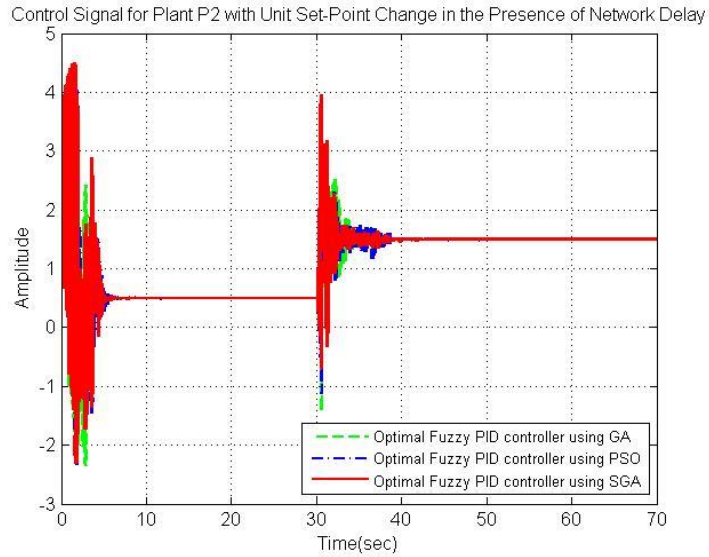
شکل (۴-۳۳) پاسخ پله دستگاه P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه



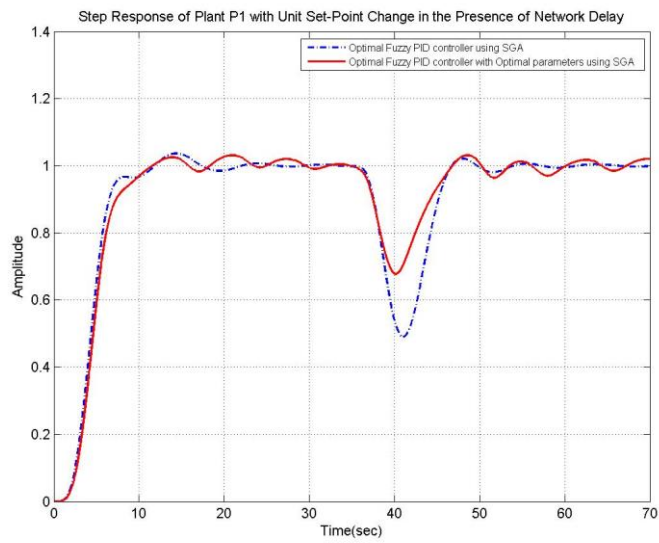
شکل (۴-۳۴) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه برای P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه



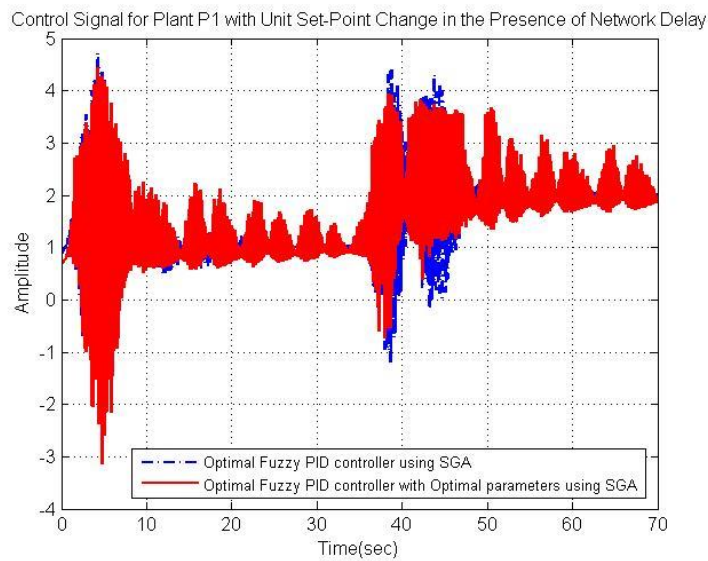
شکل (۴-۳۵) پاسخ پله دستگاہ P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه



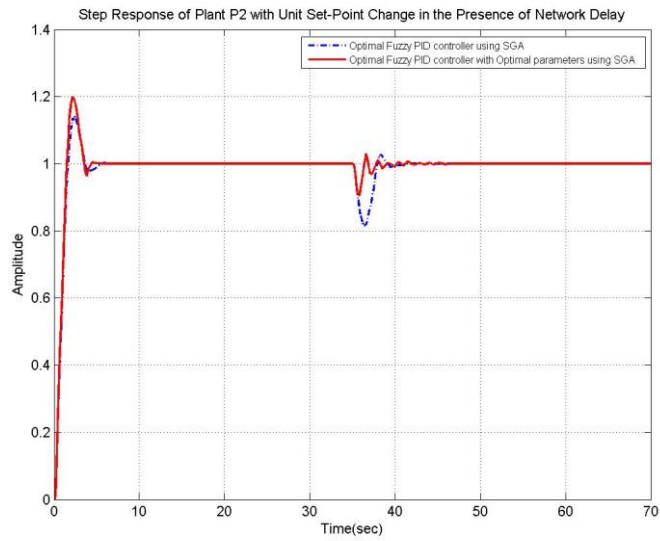
شکل (۴-۳۶) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه برای P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه



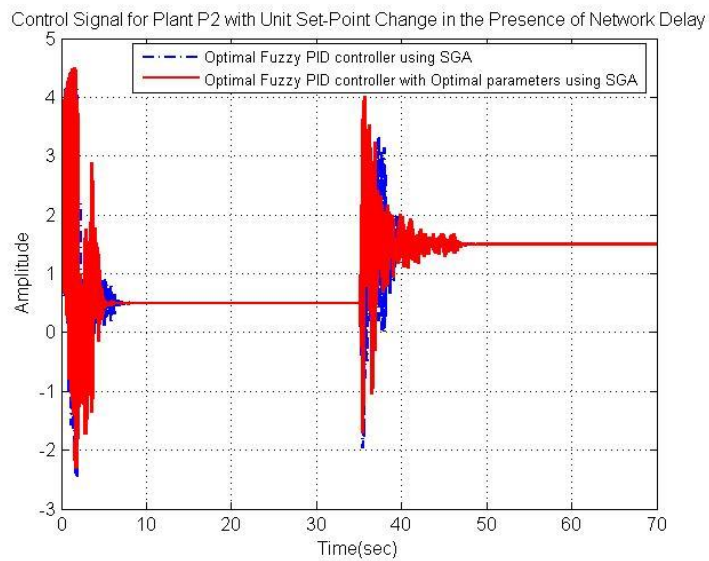
شکل (۴-۳۷) پاسخ پله دستگاہ P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد



شکل (۴-۳۸) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد برای P_1 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه



شکل (۴-۳۹) پاسخ پله دستگاه P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه برای کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد



شکل (۴-۴۰) خروجی کنترل کننده فازی با توابع عضویت بهینه و استاندارد برای P_2 با تغییر واحد در نقطه تنظیم در حضور تاخیر تصادفی شبکه

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۴-۳۳) تا (۴-۳۶) تاثیر چشمگیر بهینه‌سازی توابع

عضویت در کنترل کننده PID فازی بهینه که ضرایب و مراکز توابع عضویت آن توسط الگوریتم گروه جستجو بهینه شده باشد در عملکرد بهتر (حذف سریع تر اغتشاش بار و انحراف کمتر از نقطه تنظیم) مقابل اغتشاش بار و تغییر واحد در نقطه تنظیم و نیز در کاهش اثر تاخیر تصادفی شبکه مشاهده نمود. همچنین دامنه نوسانات سیگنال کنترل در این کنترل کننده کمتر است. در شکل های (۴-۳۷) تا (۴-۴۰) می توان تفاوت عملکرد و دامنه نوسانات خروجی کنترل کننده با توابع عضویت متقارن و با توابع عضویت بهینه نامتقارن را بوضوح ملاحظه نمود.

۴-۴- پایداری

در نتایج شبیه سازی و اجزای کنترل [۶۷] دیده می شود که با کاهش تدریجی پارامتر β ، جزء انتگرال گیر کاهش یافته که در نتیجه میرایی سیستم افزایش می یابد و سیستم پایدارتر است. جزء تناسبی شامل ضرب دو جمله β و K_d می باشد. پس کاهش β باعث کاهش جزء تناسبی شده و در نتیجه واکنش سیگنال کنترل در مقابل خطا کندتر خواهد شد.

در [۶۸] نشان داده شده است که مقدار بسیار کمی تاخیر تصادفی ممکن است سبب ناپایداری شود در حالیکه همان تاخیر اگر ثابت می بود سیستم دچار ناپایداری نمی شد. این یعنی سیستم کنترلی که برای بدترین حالت طراحی شده باشد لزوماً قادر به تضمین پایداری برای تغییرات تصادفی تاخیر میان دو کران بالا و پایین نمی باشد. در این تحقیق با استفاده از مسیر بهینه سازی به حل این مشکل پرداخته شد که ردیابی بهینه با هزینه سیگنال کنترلی نویزی برای جبران سازی تاخیر تصادفی بدست آمد. در [۶۹] از این روش برای کنترل دو دستگاه ناپایدار در حضور تاخیر تصادفی و اتلاف بسته ها استفاده شده است. می توان با استفاده از بهینه سازی ضرایب وزن دهی در تابع هدف رابطه (۴-۱۴) در مقابل از دست دادن ردیابی بهینه، سیگنال کنترل نرمی برای عملگر فراهم نمود.

فصل ۵:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

در این تحقیق سیستم‌های کنترل تحت شبکه مورد بررسی قرار گرفتند. مسئله‌های پایه‌ای که در سیستم‌های کنترل تحت شبکه مورد توجه قرار می‌گیرند عبارتند از: تاخیر ناشی از شبکه، انتقال ورودی‌ها و خروجی‌ها بصورت چندگانه و تکی و همچنین اتلاف بسته‌ها در شبکه. مسئله تاخیر شبکه (تاخیر سنسور به کنترل کننده و تاخیر کنترل کننده به عملگر) که در این پایان نامه به آن پرداخته شد، هنگام انتقال داده میان دستگاه‌های متصل به رسانه مشترک رخ می‌دهد. این تاخیر می‌تواند ثابت و یا متغیر با زمان باشد که در هر صورت باعث کاهش عملکرد سیستم‌های کنترلی خواهد شد که بدون در نظر گرفتن تاخیر طراحی شده‌اند و حتی ممکن است سیستم را ناپایدار نماید. در این پایان نامه استفاده از کنترل کننده PID فازی بهینه برای این سیستم‌ها سبب شد عملکرد مطلوبی حاصل گردد.

در این تحقیق از کنترل کننده PID و فازی PID جهت فرونشاندن اثر مخرب تاخیر تصادفی و اغتشاش بار در سیستم کنترل تحت شبکه توسط کمینه نمودن تابع هدف ITAE و ISCO استفاده شده است. سه الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات و گروه جستجو برای تنظیم ضرایب بهینه کنترل کننده PID و فازی PID بکار گرفته شدند.

نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن بود که کنترل کننده فازی PID در مقایسه با کنترل کننده PID، اغتشاش بار را سریع‌تر حذف نموده و انحراف آن از نقطه مرجع نیز کمتر بوده است و از نظر دامنه نوسانات سیگنال کنترل که ناشی از تاخیر متغیر با زمان می‌باشد نیز، خروجی کنترل کننده فازی PID نسبت به خروجی کنترل کننده PID بسیار کمتر می‌باشد.

بعلاوه، بهینه‌سازی توابع عضویت کنترل کننده فازی نیز خود تاثیر چشمگیری در دستیابی به عملکرد مطلوب داشته است. همچنین کنترل کننده‌های فازی PID که ضرایب آن با الگوریتم گروه جستجو تنظیم شده‌اند در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک و تجمع ذرات عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان

دادند.

۵-۲- پیشنهادها

به منظور ادامه تحقیقات در زمینه سیستم‌های کنترل تحت شبکه عناوین و موضوعات زیر پیشنهاد می‌گردد:

- در طراحی کنترل‌کننده‌ها محدوده‌ای برای تغییرات تاخیر در نظر گرفته شده که طراحی بر اساس آن‌ها صورت گرفته است ولی در واقعیت ممکن است میزان تاخیر از این محدوده تجاوز نماید. بنابراین بهتر است در زمان کار سیستم از ساختاری جهت اندازه‌گیری و یا پیش‌بینی تاخیر استفاده شود و طراحی بر اساس این مقادیر جدید به روز رسانی شود.
- یافتن روشی برای کنترل سیستم کنترل تحت شبکه با روش‌های دیگر در حضور تاخیر تصادفی.

مراجع

- [1] Y. Tipsuwan and M. Y. Chow, "Control methodologies in networked control systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, no. 10, pp. 1099–1111, 2003.
- [2] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *computer control systems: theory and design*, 3rd ed. New York: Dover Publications Inc., 2011.
- [3] W. Zhang, "Stability analysis of networked control systems," Case Western Reserve University, 2001.
- [4] W. Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips, "Stability of networked control systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, no. 1. pp. 84–97, 2001.
- [5] A. Bemporad, M. Heemels, and M. Johansson, *Networked Control Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- [6] J. D. Spragins, J. L. Hammond, and K. Pawlikowski, *Telecommunications: Protocols and Designs*, 1st ed. Prentice Hall, 1991.
- [7] R. A. Gupta and M. Chow, "Networked Control System: Overview and Research Trends," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 7, pp. 2527–2535, 2010.
- [8] J. W. Overstreet and A. Tzes, "An Internet-based real-time control engineering laboratory," *IEEE Control Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 19–34, 1999.
- [9] Y. Tipsuwan and M. Chow, "Network-based controller adaptation based on QoS negotiation and deterioration," ... *Soc. 2001. IECON'01. 27th ...*, vol. 00, no. C, pp. 1794–1799, 2001.
- [10] B. Etkin and L. D. Reid, *Dynamics of flight: stability and control*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [11] U. Ozguener, H. Goektag, H. Chan, J. Winkelman, M. Liubakka, and R. Krotolica, "Automotive Suspension Control Through a Computer Communication Network," in *First IEEE Conference on Control Applications*, 1992, pp. 895 – 900.
- [12] B. P. Zeigler and J. Kim, "Extending the {DEVS}-Scheme knowledge-based simulation environment for real-time event-based control," *Robot. Autom. IEEE Trans.*, vol. 9, no. 3, pp. 351–356, 1993.
- [13] Y. Tipsuwan and M. Chow, "Gain adaptation of networked mobile robot to compensate QoS deterioration," ... *IEEE 2002 28th Annu. Conf. ...*, pp. 3146–3151, 2002.

- [14] N. Xi and T. J. Tarn, "Action synchronization and control of Internet based telerobotic systems," in *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, 1999, vol. 1, pp. 219–224 vol.1.
- [15] G. S. Guthart and J. K. Salisbury, "The Intuitive/sup TM/ telesurgery system: overview and application," in *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, vol. 1, pp. 618–621.
- [16] M. E. Stieber, M. McKay, G. Vukovich, and E. Petriu, "Vision-based sensing and control for space robotics applications," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 4, pp. 807–812, 1999.
- [17] J. Kim, H. Choo, and D. S. Kim, "TCP CAE: an improved congestion control using comparative ACK-based estimator," *J. Supercomput.*, vol. 59, no. 2, pp. 1019–1034, 2010.
- [18] H. Li, M. Y. Chow, and Z. Sun, "Optimal stabilizing gain selection for networked control systems with time delays and packet losses," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 17, pp. 1154–1162, 2009.
- [19] J. Xiong and J. Lam, "Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss," *Automatica*, vol. 43, no. 1, pp. 80–87, 2007.
- [20] L. Eriksson, T. Oksanen, and K. Mikkola, "PID controller tuning rules for integrating processes with varying time-delays," *J. Franklin Inst.*, vol. 346, no. 5, pp. 470–487, 2009.
- [21] O. Kaltiokallio, L. M. Eriksson, and M. Bocca, *On the performance of the PIDPLUS controller in wireless control systems*. 2010, pp. 707–714.
- [22] J. J. Cao, J. I. N. Liang, and B. B. Cao, "Optimization of Fractional Order PID Controllers Based on Genetic Algorithms," in *The fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2005, vol. 9, no. August, pp. 5686–5689.
- [23] J. Cao and B. Cao, "Design of Fractional Order Controllers Based on Particle Swarm Optimization," *2006 IST IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 1–6, 2006.
- [24] D. Wang, J. Wang, and W. Wang, "Output feedback control of networked control systems with packet dropouts in both channels," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 221, pp. 544–554, 2013.
- [25] Y. Xia, M. Fu, and P. Shi, *Analysis and Synthesis of Dynamical Systems with Time-Delays*. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [26] L.-S. L. Hu, T. Bai, P. Shi, and Z. Wu, "Sampled-data control of networked linear control systems," *Automatica*, vol. 43, pp. 903–911, 2007.

- [27] S. Hu, D. Yue, and J. Liu, “ H_∞ filtering for networked systems with partly known distribution transmission delays,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 194, pp. 270–282, 2012.
- [28] D. Huang and S. K. Nguang, “Robust fault estimator design for uncertain networked control systems with random time delays: An ILMI approach,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 180, no. 3, pp. 465–480, 2010.
- [29] S. Sun, “Linear optimal state and input estimators for networked control systems with multiple packet dropouts,” *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 8 (10(B)), pp. 7289–7305, 2012.
- [30] J. Wu, H. R. Karimi, and P. Shi, “Network-based H_∞ output feedback control for uncertain stochastic systems,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 232, pp. 397–410, 2013.
- [31] B. Ding, “Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss and its use in model predictive control,” *Automatica*, vol. 47, no. 11, pp. 2526–2533, 2011.
- [32] J. Zhang, J. Lam, and Y. Xia, “Output feedback sliding mode control under networked environment,” *Int. J. Syst. Sci.*, no. June 2014, pp. 1–10, 2011.
- [33] J. Zhang, P. Shi, and Y. Xia, “Fuzzy delay compensation control for T-S fuzzy systems over network,” *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 43, no. 1, pp. 259–268, 2013.
- [34] W. A. Zhang, L. Yu, and H. Song, “ H_∞ filtering of networked discrete-time systems with random packet losses,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 179, no. 22, pp. 3944–3955, 2009.
- [35] D. Yue, Q. L. Han, and C. Peng, “State Feedback Controller Design of Networked Control Systems,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 51, no. 11, pp. 640–644, 2004.
- [36] H. Benítez-Pérez, A. Benítez-Pérez, and J. Ortega-Arjona, “Networked control systems design considering scheduling restrictions and local faults,” *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 9, no. 8, pp. 3225–3240, 2014.
- [37] D. Yue, E. Tian, Z. Wang, and J. Lam, “Stabilization of systems with probabilistic interval input delays and its applications to networked control systems,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans*, vol. 39, pp. 939–945, 2009.
- [38] M. Liu, D. W. C. Ho, and Y. Niu, “Observer-based controller design for linear systems with limited communication capacity via a descriptor augmentation method,” *Control Theory & Applications, IET*, vol. 6, no. 3, pp. 437–447, 2012.
- [39] M. Liu and J. You, “Observer-based controller design for networked control systems with sensor quantisation and random communication delay,” *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 43, no. 10, pp. 1901–1912, 2012.

- [40] H. Gao, X. Meng, T. Chen, and J. Lam, "Stabilization of networked control systems via dynamic output-feedback controllers," *SIAM J. Control Optim.*, vol. 48, no. 5, pp. 3643–3658, 2010.
- [41] Y. S. Y. Shi and B. Y. B. Yu, "Output Feedback Stabilization of Networked Control Systems With Random Delays Modeled by Markov Chains," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 54, no. 7, pp. 1668–1674, 2009.
- [42] H. Dong, Z. Wang, D. W. C. Ho, H. Gao, Hongli Dong, Zidong Wang, D. W. C. Ho, Huijun Gao, H. Dong, Z. Wang, D. W. C. Ho, and H. Gao, "Robust H_∞ fuzzy output-feedback control with multiple probabilistic delays and multiple missing measurements," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 18, no. 4, pp. 712–725, 2010.
- [43] W. A. Zhang and L. Yu, "Output Feedback Stabilization of Networked Control Systems With Packet Dropouts," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 52, no. 9, pp. 1705–1710, 2007.
- [44] Y. Xia, W. Xie, B. Liu, and X. Wang, "Data-driven predictive control for networked control systems," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 235, pp. 45–54, 2013.
- [45] X. Su, P. Shi, L. Wu, and Y. D. Song, "A Novel Control Design on Discrete-Time Takagi-Sugeno Fuzzy Systems With Time-Varying Delays," *Fuzzy Syst. IEEE Trans.*, vol. 21, no. 4, pp. 655–671, 2013.
- [46] C. Guo, F. Du, J. Li, J. Ren, Y. Zhang, and H. Zhou, "Networked control systems based on human-simulated intelligent and fuzzy control," in *World Automation Congress (WAC)*, 2012, pp. 1–4.
- [47] S. Tong, D. Qian, J. Ren, Y. Li, and H. Li, "Networked Predictive Fuzzy Control systems with random time delay in the forward channel," in *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2014, pp. 2042–2046.
- [48] C. Peng, D. Yue, and M. Fei, "Relaxed Stability and Stabilization Conditions of Networked Fuzzy Control Systems Subject to Asynchronous Grades of Membership," vol. 22, no. 5, pp. 1101–1112, 2014.
- [49] F. Zhou, L. Liu, and G. Feng, "Fuzzy decentralized control for a class of networked control systems with time delays and missing measurements," in *2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, 2013, pp. 306–311.
- [50] S. Kim, "Robust Takagi–Sugeno fuzzy control design for non-linear networked control systems with asynchronous premise variables," *IET Control Theory Appl.*, vol. 7, no. January, pp. 910–919, 2013.
- [51] H. Benitez-Perez and O. A. Esquivel-Flores, "Fuzzy networked control systems design considering frequency transmission and bounded delays restrictions as

- local phase problem,” in *Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on*, 2014, pp. 1852–1857.
- [52] Y. Yang, J. Xie, and L. Huanhuan, “Fuzzy control for a class of networked control systems with the variation ranges of asynchronous membership functions,” in *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*, 2015, pp. 6576–6581.
- [53] X. Jia, B. Tang, D. He, and S. Peng, “Fuzzy-model-based robust stability of nonlinear networked control systems with input missing,” in *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*, 2014, pp. 1995–2002.
- [54] J. Huang, B. Tang, D. He, and Y. Zhang, “Fuzzy-model-based stabilization of nonlinear networked control systems,” in *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*, 2014, pp. 898–905.
- [55] L. Fu, Z. Zhang, Q. Kong, and J. Mao, “The design of adaptive fuzzy PID controller with Smith compensator for Network Control Systems,” in *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2015, pp. 3037–3040.
- [56] Y. Halevi and A. Ray, “Integrated Communication and Control Systems: Part I—Analysis,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 110, no. 4, p. 367, 1988.
- [57] J. Nilsson, “Real-time control systems with delays,” Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1998.
- [58] G. C. Walsh, H. Ye, and L. Bushnell, “Stability analysis of networked control systems,” in *Proceedings of the 1999 American Control Conference*, 1999, vol. 4, pp. 2876–2880.
- [59] S. H. Hong, “Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 225–230, 1995.
- [60] R. Krtolica, Ü. Özgüner, H. Chan, H. Göktas, J. Winkelmann, and M. Liubakka, “Stability of linear feedback systems with random communication delays,” *Int. J. Control*, vol. 59, no. 4, pp. 925–953, 1994.
- [61] G. Venter, “Review of optimization techniques,” *Encycl. Aerosp. Eng.*, pp. 1–12, 2010.
- [62] G. N. Vanderplaats, *Multidiscipline Design Optimization*. Vanderplaats Research & Development, Inc. Colorado Springs, CO, 2007.
- [63] A. P. Engelbrecht, *Computational Intelligence: An Introduction*, 2nd Editio. John Wiley & Sons Inc., 2007.

- [64] J. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1992.
- [65] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948.
- [66] M. S. Gonçalves, R. H. Lopez, and L. F. F. Miguel, "Search group algorithm: A new metaheuristic method for the optimization of truss structures," *Comput. Struct.*, vol. 153, pp. 165–184, 2015.
- [67] Z. Woo, H. Chung, and J. Lin, "A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factors," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 115, no. 2, pp. 321–326, 2000.
- [68] K. Hirai and Y. Satoh, "Stability of a system with variable time delay," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 25, no. 3, pp. 552–554, 1980.
- [69] I. Pan, S. Das, and A. Gupta, "Handling packet dropouts and random delays for unstable delayed processes in NCS by optimal tuning of $PI\lambda D\mu$ controllers with evolutionary algorithms," *ISA Trans.*, vol. 50, no. 4, pp. 557–72, 2011.

Abstract

This thesis studies designing and tuning of a fuzzy PID controller using evolutionary algorithms for networked control systems. First, a conventional PID controller and a fuzzy PID controller are designed and tuned by using evolutionary algorithms without considering network delay. Then, NCSs are investigated with different random network delay in both communication channels. Due to the desirable performance of fuzzy PID controller in comparison with conventional PID controller, the membership functions of fuzzy logic controller are optimized in the next stage. The results of fuzzy PID controller with optimized MFs in suppression of load disturbance and unit change in set point and also annulling the random network delay effects are significantly impressive compared with the controller accompanied by standard MFs.

Keywords: Networked control systems, PID controller, Fuzzy Logic, Optimization, evolutionary algorithms.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Science in Control Engineering**

**Designing and Tuning of a Fuzzy PID Controller
Using Evolutionary Algorithms for Networked
Control Systems**

Seyedeh Fa'ezeh Hosseini Noorbin

**Supervisor:
Dr. Alireza Alfi**

January 2016