پایان نامه  دوره کارشناسی ارشد – مکاترونیک

# طراحی و پیاده سازی سیستم کنترل تحت شبکه سرو هیدرو موتور با احتساب تاخیر و تحلیل پایداری

رویا جلالی

استاد راهنما:

دکتر حمیدخالوزاده

# چکیده

امروزه با توسعه تکنولوژی استفاده از سیستم های کنترلی تحت شبکه شده مورد توجه قرار گرفته است. به سیستم کنترلی که در آن سنسور، کنترل کننده و عملگر اطلاعات خود را از طریق شبکه بلادرنگ ارسال کند سیستم کنترل تحت شبکه (NCS) گویند.

در این پایان نامه علاوه بر معرفی سیستمهای کنترل تحت شبکه به بررسی مشکلات ناشی از بکارگیری این سیستم ها، بلاخص اثرات ناشی از تاخیر در این سیستم ها که باعث کاهش کارایی شبکه و یا ناپایداری در آنها می گردد می پردازیم. که تلاش گردیده تا بتوان اثرات ناشی از شبکه را تا حد امکان کاهش داد.

در این راستا از شبکه عصبی و کنترل کننده بهینه کمک گرفته شده است، که به منظور کنترل سیستم با تاخیرهای ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری از شناساگر عصبی پیش بین و کنترل کننده بهینه، شناساگر عصبی و کنترل کننده عصبی، کنترل کننده PID خود تنظیم استفاده شده و سپس تلاش گردید تا برپایه تاخیر تصادفی، ضریب کنترلی پویایی برای کنترل کننده طراحی شود و همچنین با ترکیب کنترل کننده بهینه و شناساگر پیش بین به کنترل سیستم با تاخیر تصادفی پرداخته شد.

**کلمات کلیدی:** سیستم کنترل تحت شبکه، شبکه عصبی، تاخیر ثابت، تاخیر متغیر.

# فهرست


.۱مقدمه ۱

۱-۱ تعریف سیستم کنترل تحت شبکه ۵

۱-۱-۱ تاخیر ناشی از شبکه در سیستم های کنترل تحت شبکه ۹

۱-۱-۲ انتقال تکی بسته ها در مقابل انتقال چند گانه بسته ها در شبکه ۱۱

۱-۱-۳ اتلاف بسته ها در سیستم کنترل تحت شبکه ۱۲

۲.سیستم سرو هیدروموتور ۱۵

۲-۱ سیستم سرو هیدرو موتور ۱۶

۲-۱-۱ تاکومتر ۱۷

۲-۱-۲ کارت واسط ۱۸

۲-۱-۳ مدل سیستم ۱۹

۲-۱-۴ مدار درایور ۱۹

۳.تأخیر در سیستم های کنترل تحت شبکه ۲۱

۳-۱ اثرات ناشی از تاخیر ۲۲

۳-۱-۱ کاهش عملکرد ۲۲

۳-۱-۲ ناپایداری ۲۳

۳-۲ تاخیر ثابت کوچکتر از دوره نمونه برداری در سیستم کنترل تحت شبکه ۲۴

۳-۳ تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری در سیستم کنترل تحت شبکه ۲۹

۳-۳-۱ روش متعارف کنترلی به کار گرفته شده در سیستم کنترل شبکه ۲۹

۳-۳-۲ کنترل کننده بهینه به همراه شناساگر پیش بین سیستم در سیستم کنترل تحت شبکه ۳۳

۳-۳-۳ شناساگر عصبی سیستم و کنترل کننده PID عصبی خود تنظیم در سیستم کنترل تحت شبکه ۴۱

۳-۳-۴ کنترل کننده عصبی و شناساگر عصبی سیستم در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۵۰

۳-۴ تاخیر تصادفی بزرگتر از دوره نمونه برداری در سیستم کنترل تحت شبکه ۵۴

۳-۴-۱ کنترل بهینه با زمان تاخیر طولانی در سیستم کنترل تحت شبکه ۵۴

۳-۴-۲ کنترل کننده بهینه به همراه شناساگر پیش بین عصبی در سیستم کنترل تحت شبکه ۶۳

۳-۴-۳ شناساگر عصبی سیستم و کنترل کننده عصبی در سیستم کنترل تحت شبکه ۷۲

نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۶

منابع ۷۸

# فهرست شکل ها


شکل ۱-۱: شمای کلی سیستم کنترلی دیجیتال مستقیم ۳

شکل ۱-۲ : شمای کلی سیستم کنترلی توزیع شده ۴

شکل ۱-۳ : شمای کلی سیستم کنترل شبکه ۴

شکل ۱-۴ : شمایی از سیستم کنترل تحت شبکه ۵

شکل ۲-۱ : تصویر شماتیک از مدار هیدرولیکی پلانت ۱۶

شکل ۲-۲: تاکومتر SA-740A-2 ۱۷

شکل ۲-۳: کارت PCI-1711 ۱۸

شکل ۲-۴: مدار درایور ۲۰

شکل ۳-۱ : سیگنالهای سنسور و کنترل کننده تحت تاخیر ثابت کوچکتر از دوره نمونه برداری ۲۵

شکل ۳-۲: خطا ناشی از اعمال تاخیر کوچکتر از دوره نمونه برداری ۲۷

شکل ۳-۳: سیگنال کنترلی اعمال شده برای سیستمی با تاخیر کوچکتر از زمان نمونه برداری ۲۷

شکل ۳-۴- سرعت موتور با وجود کنترل کننده تحت شبکه با تاخیر ثابت کوچکتر از دروره نمونه برداری ۲۸

شکل ۳-۵- مکان موتور با وجود کنترل کننده تحت شبکه با تاخیر ثابت کوچکتر از دوره نمونه برداری ۲۸

شکل ۳-۶- مکان موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۳۱

شکل ۳-۷- سرعت موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۳۱

شکل ۳-۸- سیگنال کنترلی اعمال شده در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۳۲

شکل ۳-۹- خطای مکان سیستم در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۳۲

شکل ۳-۱۰ : سیستم شناسایی پیش بینNNARX ۳۴

شکل ۳-۱۱: شناساگر سییستم ۳۵

شکل ۳-۱۲: سیستم کنترلی با استفاده از شناساگر پیش بین ۳۶

شکل ۳-۱۳- سیگنال کنترلی اعمال شده به سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۳۸

شکل ۳-۱۴- سرعت موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۳۸

شکل ۳-۱۵- مکان موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۳۹

شکل ۳-۱۶- سرعت سیستم در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۴۰

شکل ۳-۱۷-مکان موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۴۰
شکل ۳-۱۸ : ساختار کلی کنترل کننده PID حلقه بسته ۴۱
شکل ۳-۱۹- تنظیم کننده دینامیکی ضرایب PID با شبکه عصبی ۴۳
شکل ۳-۲۰- خطای مکان سیستم در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر بزرگتر از دوره نمونه برداری ۴۴
شکل ۳-۲۱- سیگنال کنترلی اعمال شده به سیستم در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۴۵
شکل ۳-۲۲- سرعت موتور در سیستم کنترل شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۴۵
شکل ۳-۲۳- مکان موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر بزرگتر از دوره نمونه برداری ۴۶
شکل ۳-۲۴ : تنظیم کنترل کننده PID بر پایه تنظیم بوسیله چند شبکه عصبی ۴۷
شکل ۳-۲۵- سیگنال کنترلی اعمال شده به سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۴۸
شکل ۳-۲۶- سرعت موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۴۹
شکل ۳-۲۷- مکان موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۴۹
شکل ۳-۲۸- بلوک دیاگرامی از کنترل کننده و شناساگر به کار رفته در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۵۰
شکل ۳-۲۹: کنترل سیستم با استفاده از کنترل کننده عصبی ۵۱
شکل ۳-۳۰- سیگنال کنترلی اعمالی به سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۵۲
شکل ۳-۳۱- سرعت موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۵۳
شکل ۳-۳۲- مکان موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر ثابت بزرگتر از دوره نمونه برداری ۵۳
شکل ۳-۳۳: کنترل بهینه با زمان تاخیر طولانی در سیستم NCS ۵۴
شکل ۳-۳۴ : نمودار زمانی انتقال بسته ها ۵۶
شکل ۳-۳۵- سیگنال کنترلی اعمال شده به سیستم در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر تصادفی بزرگتر از دوره نمونه برداری ۶۱
شکل ۳-۳۶- سرعت موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با زمان تاخیر تصادفی بزرگتر از دوره نمونه برداری ۶۲
شکل ۳-۳۷- مکان موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر تصادفی بزرگتر از دوره نمونه برداری ۶۲
شکل ۳-۳۸: نمودار زمانی انتقال بسته ها ۶۵
شکل۳-۳۹ : کنترل بهینه با زمان تاخیر طولانی در سیستم NCS ۶۷
شکل ۳-۴۰: سیستم کنترلی با شناساگر پیش بین ۶۸
شکل ۳-۴۱: ساختار شبکه عصبی برای پیش بینی ۲ مرحله بعد ۶۸
شکل ۳-۴۲- مکان موتوردر سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر تصادفی بزرگتر از دوره نمونه برداری ۷۰

شکل ۳-۴۳- سیگنال کنترلی اعمالی به سیستم در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر بزرگتر از دوره نمونه برداری ۷۰

شکل ۳-۴۴- سرعت موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر تصادفی بزرگتر از دوره نمونه برداری ۷۱

شکل۳-۴۵: شمای کلی از سیستم تحت کنترل کننده عصبی ۷۲

شکل ۳-۴۶: کنترل سیستم با استفاده از کنترل کننده عصبی ۷۳

شکل ۳-۴۷- مکان موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر تصادفی بزرگتر از دوره نمونه برداری ۷۴

شکل ۳-۴۸- سرعت موتور در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر تصادفی بزرگتر از دوره نمونه برداری ۷۴

شکل ۳-۴۹- سیگنال کنترلی اعمالی به سیستم در سیستم کنترل تحت شبکه با تاخیر تصادفی بزرگتر از دوره نمونه برداری ۷۵

# فصل اول:

## مقدمه

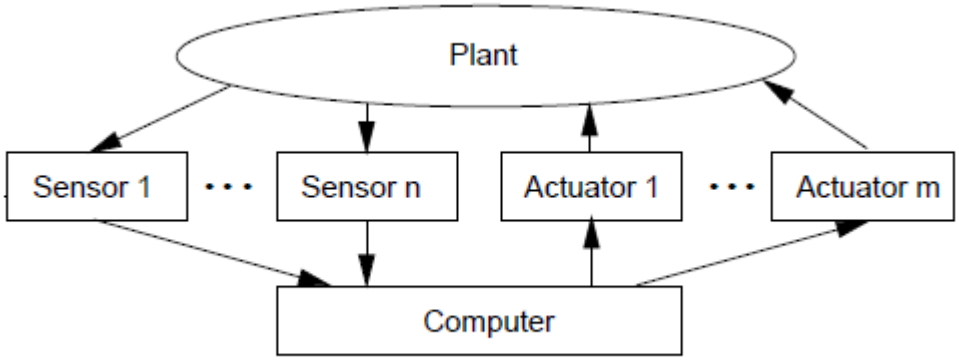
از آنجایی که شبکه های انتقال داده دارای مزیت های بسیاری است، بسیاری از شرکت ها و موسسات صنعتی نسبت به استفاده از شبکه برای اهداف کنترل از راه دور و اتوماسیون علاقه نشان دادند. و سپس با انجام تحقیقات گسترده، چندین پروتکل شبکه برای کنترل صنعتی منتشر شد. به عنوان مثال کنترل کننده شبکه (CAN[1]) در اصل در سال ۱۹۸۳ توسط شرکت رابرتت بوش آلمان برای صنایع خودرو توسعه یافت، که در حال حاضر در بسیاری از دیگر کنترل کننده های صنعتی کاربرد دارد. یکی دیگر از نمونه های موجود در این زمینه شبکه های صنعتی profibus هستند که توسط شش شرکت آلمانی و پنج موسسه آلمانی در سال ۱۹۸۷ بوجود آمده است. همچنین بسیاری از پروتکل های شبکه صنعتی شامل fieldbus وdevice net نیز در زمانهایی مشابه توسعه یافتند، بسیاری از این پروتکل ها به طور معمول دارای قدرت و قابلیت اطمینان بالا برای سیستم های بلادرنگ هستند.

در همین حال، فن آوری در شبکه های کامپیوتری و اترنت[2] به طور خاص پیشرفت سریعی داشته است. با کاهش قیمت، افزایش سرعت و کاربرد گسترده، نرم افزار های متعدد کاربردی و زیر ساخت های خوب، این شبکه ها تبدیل به رقبای اصلی برای کاربردهای کنترلی شبکه های صنعتی شدند.[۱ ]

استفاده از سیستم های کنترلی که مبتنی بر کامپیوتر باشند از سال ۱۹۵۰ شروع شد. در ابتدا استفاده از کامپیوتر در این راستا به علت حجم زیاد، توان مصرفی بالا و قابلیت اطمینان کم بسیار محدود بود، در آنها استفاده از سیستمهای آنالوگ به منظور کنترل مورد نیاز بود. در ابتدا سیستم های کنترلی دیجیتال مستقیم(DDC[3]) ظاهر شدند. شکل ۱-۱ یک سیستم کنترلی دیجیتال مستقیم را نشان می دهد در این سیستم ها اجزاء کنترل آنالوگ با یک کامپیوتر جهت پردازش های کنترلی و یا راهنمای اپراتور جایگزین گردیدند. بطور کلی اجزاء سیستم شامل پروسسورها، کنترل کننده ها، سنسورها، عملگرها و... هستند که به طور مستقیم به هم متصل می شوند. این سیستم ها گرچه دستاورد های بسیار وسیعی را در بر داشتند، اما

[1] Controller Area Network
[2] Ethernet
[3] Direct Digital Control

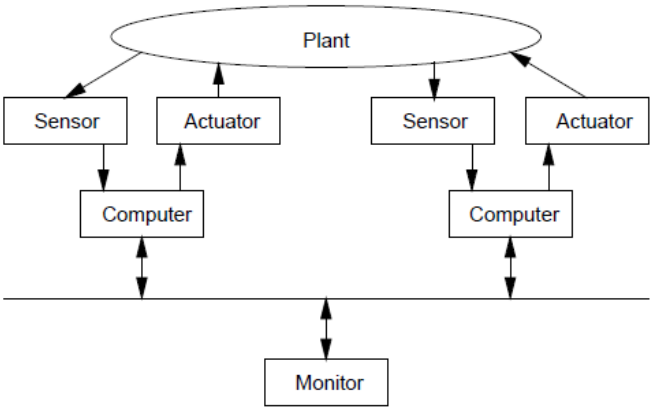
زمانیکه اجزاء سیستم افزایش پیدا می نماید اگر از اتصال نقطه به نقطه[1] استفاده شود، سیم کشی بسیار حجیم و پر هزینه گردیده و همچنین نگهداری، تعمیر و بازبینی این سیستم ها بسیار مشکل می باشد. در نتیجه به مرور زمان استفاده از سیستم های کنترل دیجیتال مستقیم منسوخ گردید.[۲]




شکل ۱-۱: شمای کلی سیستم کنترلی دیجیتال مستقیم

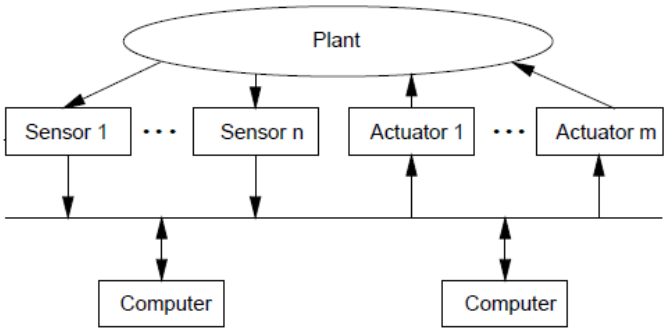
با افزایش حجم سیستم های کنترلی و توسعه سریع تکنولوژی کامپیوتری، سیستم های کنترلی توزیع شده(DCS[2]) به عرصه ظهور رسیدند. شکل ۱-۲ یک سیستم کنترلی توزیع شده را نمایش می دهد. اولین سیستم های کنترلی توزیع شده در سال ۱۹۷۵ مورد استفاده قرار گرفتند. در یک سیستم کنترلی توزیع شده، تعدادی کامپیوتر بوسیله یک شبکه با هم در ارتباط می باشند. این کامپیوتر ها عملیات پردازش را انجام داده و سپس بعد از انجام پردازش های کنترلی نتایج توسط اپراتور قابل رویت می باشند. در این سیستم ها سیگنالهای روشن و خاموش، اطلاعات مانیتورینگ، اطلاعات هشدار دهنده و سایر اطلاعاتی از این قبیل توسط شبکه سری ارسال می شوند.[۲، ۳]

[1] point-to-point
[2] Distributed Control System




شکل ۱-۲ : شمای کلی سیستم کنترلی توزیع شده

در سال ۱۹۹۰ توسعه میکروپروسسورها باعث افزایش کارایی استفاده از کامپیوترها در سیستم های کنترلی گردید و استفاده از چیپ های ASIC پیاده سازی سنسورها و عملگرها را به صورت گرههای شبکه با قیمتی اندک ممکن ساخت. این امر موجب پدید آمدن سیستمهای کنترل تحت شبکه(NCS۱) گردید که موجب ایجاد کنترلی بلادرنگ از طریق شبکه می شود. شکل ۱-۳ یک سیستم کنترل شبکه را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود اطلاعات کنترلی نمونه برداری شده بوسیله شبکه بصورت بلادرنگ منتقل می شود.[۲]



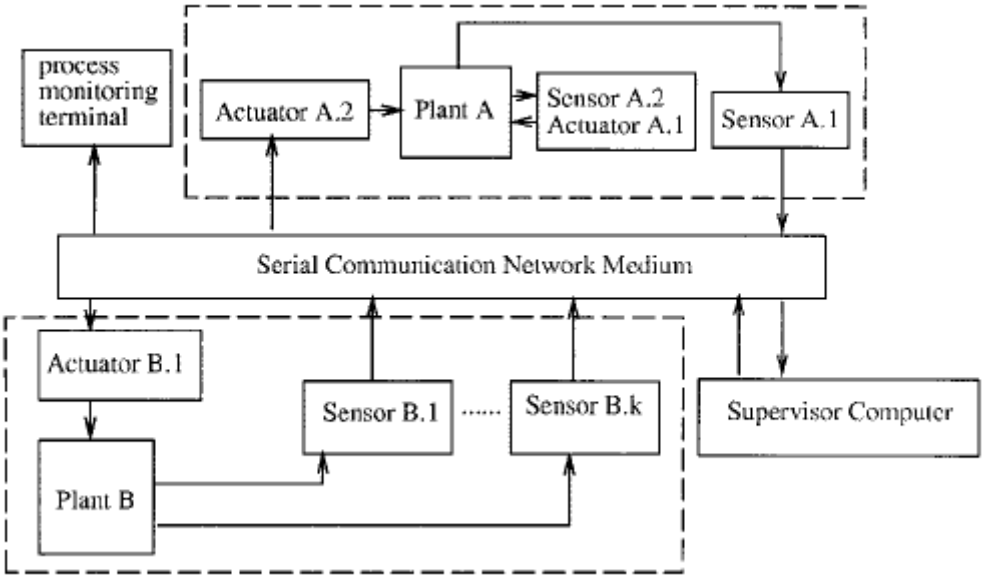

شکل ۱-۳ : شمای کلی سیستم کنترل شبکه

[1] Networked Control System

# ۱-۱ تعریف سیستم کنترل تحت شبکه

به طور کلی سیستم های کنترلی فیدبکی که در حلقه های آنها برای ارتباط بین سنسور، عملگر و کنترل کننده از یک سیستم شبکه استفاده شده باشد، سیستم کنترل تحت شبکه می نامند. شمای کلی از سیستم کنترل تحت شبکه در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. آنالیز این سیستم ها به علت وجود شبکه در حلقه فیدبک بسیار پیچیده می باشد.[۲،۳]

سیستم های کنترل شبکه را می توان به سیستم های شبکه محلی و سیستمهای کنترلی مبتنی بر اینترنت تقسیم بندی کرد.




شکل ۱-۴ : شمایی از سیستم کنترل تحت شبکه

در سیستم های کنترل شبکه محلی، اجزاء بوسیله اتصالات محلی به هم متصل می شوند. بطور معمول تعیین پارامترهای تاثیر گذار شبکه بر روی سیستم کنترلی، مانند تاخیر و اتلاف اطلاعات در این سیستم ها امکان پذیر می باشند. در مقابل این سیستم ها، سیستم های کنترل شبکه اینترنتی می باشند که بصورت توزیع شده بود و اجزاء سیستم بوسیله شبکه محلی و اینترنت با هم در ارتباط هستند.[۲]

از آنجا که در بسیاری از سیستمهای کنترلی اجزاء سیستم بصورت توزیع شده می باشند، لزوم استفاده از سیستم های کنترل شبکه و مدلی برای آنالیز آنها مشخص می گردد.

برخی از مزایا استفاده از سیستم کنترل شبکه بشرح زیر می باشد:[۴]

- قابلیت انتقال بالا
- قابلیت پیاده سازی در محیط های صنعتی
- قیمت تمام شده کم

همچنین برخی از مزایای این سیستم ها نسبت به سیستم های انتقال نقطه به نقطه عبارتند از: [۴]

- افزایش قابلیت اطمینان و آزمون پذیری آسانتر
- بالا بردن کارائی سیستم
- کاهش فضا و سیم کشی مورد نیاز

در مقابل مزایای ذکر شده استفاده از سیستم کنترل شبکه دارای مشکلاتی نیز می باشدکه برخی از آنها به شرح زیر است:[ ۳]

- تاخیر
- اتلاف اطلاعات
- بسته بندی چندگانه

در این راستا کارهای بسیاری انجام شده است از جمله Halevi and Ray یک سیستم زمان پیوسته و کنترل کننده زمان گسسته را در نظر گرفت و ارتباطات یکپارچه و سیستم کنترل (ICCS) را با استفاده رویکرد زمان گسسته آنالیز کردند. آنها یک کنترل کننده مبتنی بر زمان با عدم هماهنگی بین دستگاه و کنترل

کننده را مطالعه کردند. سیستم از طریق یک بردار حالت افزوده[1] شده نشان داده شده است که در بردارنده مقادیر ورودی و خروجی قبلی سیستم می باشد که اینها علاوه بر بردارهای حالت فعلی سیستم و کنترل کننده است. این منجر به یک مدل ابعاد محدود گسسته، زمان متغیر می شود. آنها همچنین پیام های نرسیده و دوره های بدون پیام را هم در نظر گرفته اند.[۵]

مسئله پایداری را برای سیستم کنترل شبکه (NCS) تکین با تاخیر متغیر با زمان در نظر گرفته است. آنها راه اندازی سنسور را مبتنی بر زمان و عملگر و کنترل کننده را مبتنی بر رویداد در نظر گرفته اند و تاخیر شبکه را متغیر با زمان و کوچکتر از دوره نمونه برداری در نظر گرفته اند. سپس سیستم را به صورت سیستم گسسته همراه با تاخیر ورودی مدل کردند. آنها بر اساس تئوری پایداری لیاپانوف و LMI ، معیار ثبات را بدست آوردند و کنترل فیدبک حالت مورد نظر در همان زمان داده شده را بدست آوردند.[۶]

Nilsson نیز NCS ها را در حالت زمان گسسته بررسی کرده است. وی سپس تاخیر های شبکه را بصورت ثابت، تصادفی مستقل و تصادفی در نظر گرفته و سپس آنها را از طریق زنجیره مارکوف مدل کرد و سپس مسئله کنترل بهینه LQG را برای مدل های مختلف تاخیر حل کرد.[۷ ]

Walsh و همکاران یک سیستم پیوسته و یک کنترل کننده پیوسته را در نظر گرفتند. کنترل شبکه که توسط سایر گره ها پخش می شود، فقط بین گره های سنسور و کنترل کننده است. آنها مفهوم حداکثر زمان مجاز برای ارسال داده (MATI[2]) را معرفی کردند که با $\tau$ نشان داده می شود. فرض می شود پیام های پی در پی سنسورها با فاصله $\tau$ دریافت می شوند. هدف آنها پیدا کردن مقداری برای $\tau$ برای تضمین عملکرد مطلوب NCS (مثل پایداری) بود. آنها فرض می کنند که سیستم فیدبک بدون وجود شبکه به فرم زیر است

[1] augment
[2] Maximum Allowable Transfer Interval

$$\dot{z}(t) = Az(t)$$
$$z(t) = [x^T(t), e^T(t)]^T$$
$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

۱-۱

که در آن $X_p$ و $X_c$ حالت سیستم و کنترل کننده را نشان می دهد، عموما به صورت نمایی پایدار است. بنابراین یک p وجود دارد بطوریکه

$$A_{11}^T P + P A_{11} = -I$$

۲-۱

سپس فرض می شود تاثیرات شبکه از طریق خطا قابل محاسبه است، e(t). به این ترتیب بردار حالت سیستم شبکه $z(t) = [x^T(t), e^T(t)]^T$ است و بنابراین سیستم حلقه بسته شبکه $\dot{z}(t) = Az(t)$ است که در آن A به صورت $A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ می باشد.

Walsh و همکارانش دو روش زمانبندی را مطالعه کردند: Try-Once-Discard[1] وToken-Ring-Type با زمانبندی استاتیک. با فرض اینکه p گره سنسور مرتبط به سنسور وجود دارد، زمانبندی استاتیک دقیقا به این معنی است که هر گره دقیقا یکبار اجازه انتقال پیدا می کند و تمامی انتقال های p گره با یک ترتیب مشخص انجام می شود. بر اساس محدودیت MATI، کنترل کننده باید یک سیستم انتقال را از حداقل یکی از سنسور ها در هر T ثانیه دریافت کند. از اینرو در زمانبندی استاتیک تمام مقادیر سنسورها در بیشترین حالت pτ ثانیه بروز می شود.[۸]

همانطور که قبلا نیز اشاره شد مسئله های پایه ای که در سیستم کنترل تحت شبکه مورد توجه قرار می گیرد عبارتند از: تاخیر ناشی از شبکه، انتقال ورودی ها و خروجی ها به صورت چندگانه و تکی و همچنین گم شدن بسته ها در شبکه است، که در این پایان نامه با در نظر گرفتن تاثیر تاخیر در سیستم تلاش

[1] TOD

گردیده تا بتوان سیستم را به گونه ای کنترل نمود که تاخیر تاثیر چندانی در سیستم نداشته باشد. در اینجا ما به شرح مختصری از مشکلات موجود در این سیستم ها می پردازیم.

## ۱-۱-۱ تاخیر ناشی از شبکه در سیستم های کنترل تحت شبکه

تاخیر شبکه در سیستم کنترل تحت شبکه زمانی اتفاق می افتد که سنسورها، عملگرها و کنترل کننده ها داده ها را در شبکه مبادله می کنند. این تاخیر می تواند باعث کاهش عملکرد سیستم های کنترل طراحی شده در حالتی باشد که در ابتدای طراحی کنترل کننده، تاخیر در نظر گرفته نشده است و یا حتی می تواند باعث ناپایداری در سیستم نیز بشود. بسته به پروتکل شبکه کنترل(MAC[1])، تاخیر شبکه ممکن است ثابت، متغیر با زمان و یا حتی تصادفی باشد. [۳]

پروتکل های این مجموعه معمولا در دودسته طبقه بندی می شوند: دسترسی تصادفی و زمانبندی شده.

در پروتکل های شبکه محلی با خدمات حلقوی مانند IEEE 8024, SAE token bus, Profibus, IEEE 802.5, SAE Token ring, MILSTD155313 و... سیگنالهای کنترل و حسی با رفتاری قطعی در یک چرخه منظم منتقل می شوند. بنابراین تاخیر نیز به صورت دوره ای (متناوب) است و می توان با یک تابع متناوب آن را مدل کرد چنان که $\tau_k^{sc} = \tau_{k+1}^{sc}$ و $\tau_k^{ca} = \tau_{k+1}^{ca}$ که در آن $\tau_k^{ca}$ و $\tau_k^{sc}$ تاخیر کنترل کننده به عملگر و تاخیر سنسور به کنترل کننده در زمان نمونه برداری k است. در عمل سیستم کنترل تحت شبکه ممکن است به دلالیل مختلف تغییراتی کوچک در تاخیر دوره ای را تجربه کند.

[1] Medium Access Control

در شبکه های دسترسی تصادفی غالبا از CSMA[1] استفاده می شود، در حالی که در شبکه های زمانبندی شده معمولا TDMA[2] و TP به کار می رود. شبکه های کنترلی که از پروتکل های CSMA استفاده می کنند شامل Device Net و Ethernet می شوند.

در شبکه CSMA، شبکه قبل از هر انتقال بررسی می شود، زمانی که شبکه خالی است انتقال به سرعت شروع می شود، در غیر این صورت تا زمانی که شبکه خالی شود منتظر می ماند، اما زمانی که دو یا چند گره همزمان انتقال انجام دهند برخورد اتفاق می افتد، راه حلی که برای این برخورد در نظر گرفته می شود به پروتکل به کار رفته بستگی دارد.

Device Net از پروتکل (CSMA/BA[3]) استفاده می کند که این پروتکل به این صورت عمل می کند که ابتدا پیام ها را اولویت بندی می کند و در هنگام برخورد پیام هایی که بالاترین اولویت را دارند بدون هیچ گونه وقفه ای منتقل می شوند و پیام هایی با اولویت کمتر کنسل می گردند و هنگامی که شبکه خالی شد مجددا انتقال پیدا می کنند.

Ethernet پروتکل (CSMA/CD[4]) را به کار می برد زمانی که یک برخورد اتفاق افتد، تمام گره هایی که دچار برخورد شده اند برای انتقال مجدد منتظر یک زمان تصادفی می مانند، بسته ها در اینگونه شبکه ها تحت تاثیر تاخیر های تصادفی قرار می گیرند و در بدترین حالت نیز زمان انتقال بسته نامحدود می شود.

علاوه بر این، این شبکه ها با تاخیر هایی به منظور صف بندی نیز روبرو هستند، که برای مثال شامل تاخیر های زمان صف بندی در یک سوئیچ یا روتر، و یا تاخیر انتشار از مسیرهای مختلف شبکه و.. می باشد.

در شبکه ها در حالت کلی می توان تاخیر ها را با استفاده از فرمول های مختلف که بر اساس احتمالات و ویژگی های شبکه است مدل کرد اما این تکنیک ها برای فرمولاسیون سیستم کنترل تحت شبکه در شبکه های مختلف و کاربرد های خاص شبکه متفاوت است و مدل کردن تاخیر می تواند به روش های متفاوتی

[1] Carrier Sense Multiple Access
[2] Time Division Multiple Access
[3] Carrier Sense Multiple Access /Bitwise Arbitration
[4] Carrier Sense Multiple Access /Collision Detection

صورت گیرد. از جمله روش ها می توان به روش های پیچیده ای مانند زنجیره مارکوف[۱۰,۱۱,۹] ، مدل جریان سیال[۱۲]، ARMA [۱۳] و... اشاره کرد.

بنابراین به این نوع شبکه ها با پروتکل CSMA، شبکه های غیر قطعی می گویند. با این وجود اگر پیام های شبکه اولویت بندی شوند، پیام هایی با اولویت بالاتر شانس بیشتری برای انتقال به موقع دارند.[ ۱و۳]

## ۱-۱-۲ انتقال تکی بسته ها در مقابل انتقال چند گانه بسته ها در شبکه

انتقال تکی به این معنی است که سنسورها یا داده های عملگر ها کنار هم در یک بسته شبکه تجمع می یابند و در یک زمان منتقل می شوند در حالی که در انتقال چندگانه بسته ها سنسورها یا داده های عملگر ها به صورت بسته های مجزایی در شبکه منتقل می شوند و ممکن است همزمان به سیستم و یا کنترل کننده نرسند. یک دلیل برای انتقال چندگانه بسته ها این است که شبکه های packet-switching به دلیل محدودیت اندازه بسته ها قادر به حمل اطلاعات محدودی در یک بسته هستند و بنابراین حجم زیاد داده ها برای انتقال باید به بسته های چند گانه برده شود. دلیل دیگر این است که سنسورها و عملگر ها در یک سیستم کنترل تحت شبکه غالبا در یک فضای بزرگ فیزیکی توزیع می شوند و قرار دادن داده ها در یک بسته شبکه امکان پذیر نیست. سیستم های متداول نمونه گیری فرض می کنند که خروجی های سیستم و ورودی های کنترل کننده در یک زمان تحویل داده می شوند که ممکن است در سیستم های کنترل شبکه ای با انتقال چندگانه بسته ها این مساله درست نباشد. به دلیل تاخیر های دسترسی به شبکه کنترل کننده ممکن است قادر به دریافت تمام خروجی های بروزرسانی شده سیستم در زمان محاسبه سیگنال کنترلی نباشد.

به همین دلیل است که شبکه های مختلف را فقط برای کاربردهای خاصی به کار می برند برای مثال شبکه Ethernet، اساسا برای انتقال اطلاعاتی مثل فایل های داده ها طراحی شده است و قادر است تا ۱۵۰۰ بایت

داده را در یک بسته حمل کند. از اینرو، بهتر است داده های سنسورها در یک بسته جمع شوند و با هم به صورت یک بسته منتقل شوند. و یا Device Net، با ویژگی انتقال مکرر داده های کنترل با اندازه کوچک دارای فضای داده ماکزیمم ۸ بایت برای هر بسته است بنابراین داده های سنسور غالبا باید وارد بسته های مختلف در Device Net شوند.[۳]

### ۱-۱-۳ اتلاف بسته ها در سیستم کنترل تحت شبکه

گم شدن بسته های شبکه در سیستم کنترل تحت شبکه زمانی اتفاق می افتد که از بین رفتن گره و یا برخورد پیام داریم. اگرچه بیشتر پروتکل های شبکه دارای مکانیزم انتقال مجدد بسته ها هستند، اما فقط در یک زمان محدود می توانند منتقل شوند. پس از تمام شدن این زمان بسته ها حذف می شوند. علاوه بر این، برای داده های کنترل فیدبک بلادرنگ[1] مثل اندازه گیری های سنسور و سیگنال های کنترل محاسبه شده، دور انداختن پیام های انتقال نیافته و قدیمی و انتقال بسته های جدید در دسترس مزیت است. در این حالت، کنترل کننده همیشه داده های جدید را برای محاسبات کنترل دریافت می کند. معمولا سیستم های کنترل فیدبک می توانند تا مقدار مشخصی از گم شدن داده ها را تحمل کنند اما بهتر است تعیین کنیم که آیا سیستم زمانی که انتقال بسته ها فقط با یک نرخ مشخص انجام می شود، پایدار است یا خیر و حداقل میزان قابل قبول برای نرخ انتقال بسته ها را محاسبه کنیم.[ ۳]

[1] real-time feedback

یکی از موارد تاثیر گذار در اینگونه سیستم ها تنظیم زمان نمونه برداری است. به عنوان مثال در یک اتومبیل جدید معمولی دو شبکه کنترل کننده محلی (CAN) وجود دارد، که یکی با سرعت بالا برای کنترل قسمت های حساسی مانند موتور است و دیگری دارای سرعت پایین تری است که برای مثال برای قفل ها، پنجره ها و سایر دستگاه ها استفاده می شود. نتایج تحقیقات نشان داده است که رهایی از صف های شبکه و کنترل ترافیک و زمانبندی ها می تواند باعث بهبود عملکرد سیستم حلقه بسته شود.

می توان با استفاده از زمانبندی صف ها و کنترل ترافیک سیستم را کنترل نمود و از گم شدن بسته ها تا حد زیادی اجتناب کرد. در میان الگوریتم های زمانبندی می توان به الگوریتم زمانبندی ثابت اشاره کرد این الگوریتم از لحاظ عدالت، عدالت را حفظ می کند و امکان برخورد بین بسته ها بسیار کم است، اما در اینگونه سیستم ها دیگر اولویتی برای پیام های اضطراری وجود ندارد و همچنین یک خرابی کوچک می تواند شبکه را از کار بیندازد.

اما روش دیگری که وجود دارد زمانبدی دینامیکی است، این نوع زمانبندی برای سیستم هایی که منابع شبکه بسیار کمیاب و محدود هستند باعث از بین رفتن عدالت و منابع اطلاعاتی می شود، بنابراین وجود یک زمانبندی دینامیکی که بتواند به خوبی عمل تخصیص منابع را انجام دهد برای سیستم لازم است. [۴]

علاوه بر روش های موجود به منظور کنترل سیستم با وجود تاخیر در شبکه روش هایی نیز وجود دارند که به کمک آنها می توان تاخیر در شبکه را کاهش داد تا با کاهش تاخیر شبکه، سیستم ما در وضعیت بهتری