مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
مقاله پژوهشی
جلد۱۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، صفحه ۱۴۷- ۱۲۹

سیستم‌های کنترل شبکه‌ای

علی‌اکبر افضلیان[۱] و مرتضی پیرمحمد طلاتپه[۲]

[۱] دانشیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی،تهران، ایران Afzalian@sbu.ac.ir

[۲] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی،تهران، ایران M_pirmohammad@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵

چکیده: سیستم‌های کنترل شبکه‌ای (NCS) یک زمینه جدید در سیستم‌های کنترل است که با استفاده روزافزون از شبکه‌های ارتباطی در سیستم‌های کنترل پدید آمده است. NCS به سیستم کنترلی اطلاق می‌شود که در آن حسگرها، محرک‌ها و کنترل‌کننده‌ها از طریق یک شبکه ارتباطی داده به‌هم متصل می‌شوند و امکان نظارت و کنترل از راه دور سیستم را فراهم می‌کنند. استفاده از شبکه‌های ارتباطی در سیستم‌های کنترل مزایای متعددی از جمله، کاهش هزینه سیم‌کشی، افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود مقیاس‌پذیری را به همراه دارد. با این حال، ادغام شبکه‌های ارتباطی در سیستم‌های کنترل، چالش‌های جدیدی مانند تأخیر در ارسال داده، از دست دادن بسته‌های داده و ازدحام در شبکه را نیز به همراه خواهد داشت، که به روش‌های جدید برای مدل‌سازی و طراحی سیستم کنترل نیاز دارد. تحقیقات در کنترل سیستم‌های شبکه‌ای بر توسعه روش‌های جدید برای مدل‌سازی، تخمین، شناسایی و طراحی سیستم کنترل، متمرکز است که تأثیرات شبکه‌های ارتباطی بر رفتار سیستم را در نظر می‌گیرد. به‌طور کلی، زمینه NCS یک حوزه تحقیقاتی مهم است زیرا امکان توسعه سیستم‌های کنترل کارآمدتر و انعطاف‌پذیرتر را فراهم می‌کند که می‌توانند در طیف گسترده‌ای از کاربردها اعمال شوند. NCS را می‌توان در کاربردهای مختلفی مانند اتوماسیون صنعتی، شبکه‌های هوشمند انرژی، سیستم‌های حمل و نقل و اتوماسیون ساختمان یافت. این مقاله با بیان پیدایش سیستم‌های کنترل از حوزه زمان پیوسته تا کنترل شبکه‌ای، به مقایسه آن با سیستم‌های کنترل سنتی می‌پردازد. در ادامه، مهم‌ترین چالش‌ها در NCS و راه‌کارهای آنها پرداخته خواهد شد. ضمن مرور کارهای تحقیقاتی انجام شده در ایران و سایر کشورها، برخی کاربردهای مهم کنترل شبکه‌ای نیز مورد بحث قرار می‌گیرد. در انتها، سمت‌گیری‌های احتمالی پیش‌رو در توسعه سیستم‌های کنترل شبکه‌ای ارائه خواهد شد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های کنترل شبکه‌ای، شبکه حسگرها، محدودیت‌های شبکه داده، توپولوژی شبکه، متحرک‌های متصل خودران.

Networked Control Systems

Ali A. Afzalian, and Morteza Pirmohammad Talatape

Abstract: Networked Control Systems (NCS) is a new field in control systems that has emerged by the use of communication networks in control systems. NCS refers to a control system in which sensors, actuators, and controllers are connected via a communication network and enable remote monitoring and control. The use of communication networks in control systems have many advantages, like reducing the cost of wiring, increasing flexibility, and improving scalability. However, the integration of communication networks in control systems will also carries new challenges such as data transmission delay, data packet loss, and network congestion, that require new methods for modeling and designing control systems. Research in the networked control systems is focused on the development of new modeling, estimating, identifying, and designing methods, which the effects of communication networks on the system's behavior will be taken into account. In general, the field of NCS is an important research area because it allows the control systems to be

نویسنده عهده دار مکاتبات: علی‌اکبر افضلیان

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

applied in a wide range of applications and develop it in more efficient and flexible way. NCS can be found in various applications such as industrial automation, smart energy grids, transportation systems, and house automation. This article describes the emergence of control systems from the field of continuous time to networked control and compares it with traditional control systems. Furthermore, the most important challenges in NCS and related approaches will be discussed. Important applications of networked control systems by reviewing some featured case studies in Iran and other countries are also discussed. In the end, possible future directions in the development of networked control systems will be presented.

Keywords: Networked control systems, Sensor networks, Data network constraints, Network topology, Connected autonomous vehicles.

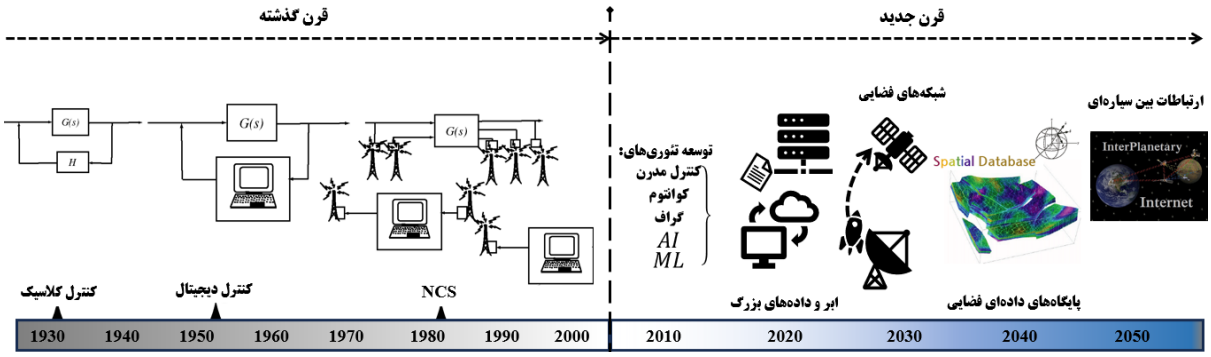
۱- معرفی

۱-۱- مقدمه

ظهور اینترنت باعث ایجاد توده عظیمی از شبکه‌های کوچکتر محلی، دانشگاهی، تجاری و دولتی شد که می‌توانست اطلاعات و خدماتی مانند پست الکترونیکی، چت آنلاین، انتقال فایل، صفحات وب به‌هم پیوسته را ارائه دهد [1]. در دهه‌های اخیر، توسعه سریع ارتباطات، کنترل و فناوری‌های رایانه‌ای، تأثیر اساسی در ساختار سیستم‌های کنترل داشته‌اند. پس از شروع کاربرد سیستم‌های کنترل دیجیتال در دهه ۱۹۶۰ یکی از اولین فناوری‌های سیستم‌های کنترل شبکه‌ای (NCS)[1] توسط رابرت بوش[2] در اشتوتگارت آلمان در سال ۱۹۸۳ برای بررسی امکان استفاده از شبکه داده در کنترل اتوماسیون خودرو به‌کارگرفته شد، که منجر به پیدایش فناوری CAN[3] گردید [2].

شکل (۱) جدول زمانی تکامل فناوری از کنترل پسخور کلاسیک به کنترل دیجیتال و NCS و در ادامه، جهت‌گیری‌های ممکن پیش رو را نشان می‌دهد. در ابتدا سیگنال‌های کنترلی با استفاده از پردازشگرهای آنالوگ تولید می‌شدند و تجزیه و تحلیل فرکانس و تبدیل لاپلاس ابزارهای اولیه برای بررسی رفتار فرآیندها بودند. ایرادات اصلی چنین رویکردهایی دقت کم، محدویت پهنای باند، خطای دریفت، نویز و قابلیت‌های محدود برای تعمیم به سیستم‌های کنترل غیرخطی[4] می‌باشد. با پیشرفت پردازنده‌ها، کنترل‌کننده‌های دیجیتال جایگزین فناوری آنالوگ شدند. کنترل یک فرآیند آنالوگ با یک سیستم الکترونیکی گسسته باعث ایجاد خطا می‌شود. لذا نمونه‌برداری و تبدیل اندازه‌گیری‌های حسگرها به داده‌های دیجیتال و بالعکس، در تبدیل خروجی کامپیوترهایی که نقش کنترل‌کننده را بر عهده داشتند، اهمیّت پیدا کردند و تئوری نمونه‌برداری و تبدیل Z به ابزارهای استاندارد در طراحی و تحلیل سیستم‌های کنترل دیجیتال تبدیل شدند [3].

در سیستم‌های کنترل قدیمی، اتصال بین سنسورها، کنترل‌کننده‌ها و محرک‌ها معمولاً توسط سیم‌کشی به‌صورت پورت به پورت انجام می‌گرفت، که ممکن بود مشکلاتی در سیم‌کشی، تعمیر و نگهداری و انعطاف‌پذیری سیستم ایجاد کند. چنین اشکالاتی در بسیاری از سیستم‌های اتوماسیون به دلیل پیچیدگی زیاد فرآیندهای تحت کنترل ظاهر می‌شوند. از این رو، سیستم‌های کنترل شبکه‌ای توجه ویژه‌ای در این حوزه را به خود جلب کردند. استفاده از یک شبکه چند منظوره برای اتصال عناصر غیرمتمرکز، منجر به معماری انعطاف‌پذیر شده و به‌طور کلی هزینه‌های نصب و نگهداری را کاهش می‌دهد. امروزه، NCS به‌طور گسترده در بسیاری از سیستم‌ها مانند اتوماسیون اتومبیل، ساختمان هوشمند، شبکه‌های حمل‌ونقل، و وسایل نقلیه بدون سرنشین مورد استفاده قرار می‌گیرد [4]. شکل (۲) مصالحه بین کارایی سیستم کنترل و نرخ نمونه‌برداری را نمایش می‌دهد. عملکرد کنترل فقط برای طیفی از نرخ نمونه‌برداری از P_B تا P_C

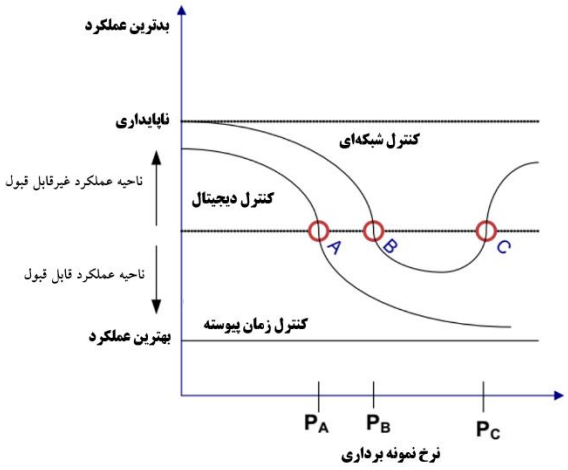


شکل ۱: سیر تکاملی پیدایش کنترل شبکه‌ای و جهت‌گیری آن در آینده

[1] Networked control systems
[2] Robert Bosch GmbH
[3] Controller area network
[4] Nonlinearities

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

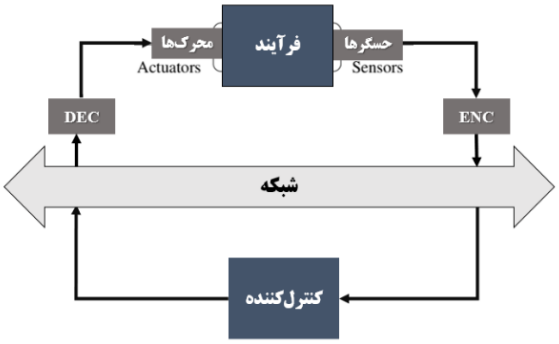
قابل استفاده است. افزایش نرخ نمونه‌برداری، باعث افزایش تأخیر شبکه شده و منجر به کاهش کارایی سیستم کنترل خواهد شد [3].



شکل ۲: مصالحه بین کارایی سیستم کنترل و نرخ نمونه‌برداری

۱-۲- مروری بر سیستم کنترل شبکه‌ای

ایده‌ی سیستم کنترل شبکه‌ای از یک سیستم کنترل پسخور مرسوم که توسط یک شبکه ارتباطی، حلقه کنترلی را تشکیل می‌دهد برگرفته شده است. شکل (۳) ساختار کلی NCS را نشان می‌دهد.



شکل ۳: یک ساختار نوعی برای NCS

شبکه ارتباطی مهم‌ترین عامل در شکل‌گیری NCSهاست و قابلیت اطمینان، امنیت، سهولت استفاده و قابلیت دسترسی مواردی هستند که در انتخاب نوع فناوری ارتباطی مورد استفاده در شبکه، تأثیر می‌گذارند. نظریه‌های مرسوم کنترل مبتنی بر سیستم‌های دینامیکی است، که هر جزء آن از طریق کانال‌های ارتباطی ایده‌آل به یکدیگر متصل می‌شوند، در حالی که استفاده از شبکه‌های ارتباطی در سیستم‌های کنترل منجر به کنترل شبکه از طریق کانال‌های غیر ایده‌آل خواهد شد که تفاوت اصلی بین سیستم‌های کنترل سنتی و NCS می‌باشد [4]. تحقیقات در خصوص NCSها، به دو دسته طبقه‌بندی می‌شود [3, 5]. دسته اول مربوط به کنترل شبکه[1] است، که در مورد نوع ارتباطات و شبکه‌ها برای ایجاد شبکه‌هایی مناسب برای NCSهای زمان حقیقی (بلادرنگ) می‌باشد. دسته دوم عبارتست از کنترل تحت شبکه[2]، یعنی پرداختن به سیاست‌ها و قوانین کنترل و طراحی سیستم کنترل تحت شبکه داده، به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب شبکه، مانند تأخیر، حذف بسته-داده‌ها و غیره.

برنامه‌های کاربردی کنترل شبکه‌ای را می‌توان به دو دسته برنامه‌های کاربردی حساس به تأخیر (زمان) و برنامه‌های کاربردی غیرحساس به تأخیر تقسیم‌بندی نمود. در برنامه‌های حساس به تأخیر، زمان مهم بوده و اگر تأخیر از محدوده زمانی از پیش تعیین شده بیشتر شود، ممکن است فرآیند ناپایدار شده، و یا کارایی سیستم کاهش یابد. عملیات از راه دور از طریق شبکه برای اطفاء حریق، عملیات زیردریایی، و رانندگی خودکار در جاده، کاربردهایی از برنامه‌های حساس به تأخیر زمانی به شمار می‌روند. از سوی دیگر، برنامه‌های غیرحساس به تأخیر، برنامه‌هایی هستند که ضرب‌الاجل در آن‌ها اهمیّتی ندارد. نمونه‌هایی از این برنامه‌ها عبارتند از: ایمیل، *ftp*، *DNS* و *http* [1].

فناوری‌های ارتباطی مختلفی برای سیستم‌های کنترل شبکه‌ای، به‌صورت سیمی و بی‌سیم معرفی شده‌اند. از مزایای سیستم‌های کنترل شبکه‌ای با ارتباطات بی‌سیم در مقایسه با نوع سیمی انعطاف‌پذیری، قابلیت گسترش و پشتیبانی راحت می‌باشد اما در مقابل، از قابلیت اطمینان پایین‌تری برخوردار هستند، که می‌تواند تأثیر نامطلوب بر کارایی سیستم داشته باشد. یکی از فناوری‌های مهم که در دو دهه اخیر مورد استقبال بسیاری از محققین در این عرصه قرار گرفته است، تجهیزات ارتباط بی‌سیم *ZigBee* می‌باشد.

۱-۲-۱- انواع سیستم کنترل شبکه‌ای

در ادامه، انواع سیستم‌های کنترل شبکه‌ای بر اساس هدف طراحی شرح داده می‌شود.

۱-۲-۱-۱- کنترل با داده‌های نمونه‌برداری

اگر تمام تجهیزات کنترل در محل یکسانی قرار گیرند، سیستم کنترل حاصل اغلب به عنوان یک واحد دیجیتال در نظر گرفته می‌شود. از اواخر دهه ۱۹۵۰، نظریه کنترل با داده‌های نمونه‌برداری شده به خوبی برای سیستم‌های کنترل دیجیتال توسعه یافتند. استراتژی ورودی تأخیردار[3] برای این نوع کنترل، که ابتدا در سال ۱۹۸۸ انجام گرفت، به لطف ظهور روش نابرابری ماتریسی خطی (LMI)[4] و همچنین پیشرفت فناوری‌های کنترل شبکه‌ای، محبوبیت دوباره پیدا کرده است. کران بالای تأخیر در دو نمونه‌برداری پشت سر هم و انتخاب کنترل‌کننده مناسب، اغلب به راحتی با استفاده از روش ورودی تأخیردار، تعیین می‌شود.

۱-۲-۱-۲- کنترل از بستر شبکه

تأخیرهای ناشی از شبکه و از دست دادن بسته‌های داده، تاکنون به عنوان مسائل چالش برانگیزی در NCS باقی مانده‌اند. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری، پایدارسازی و بهبود کارایی NCSها با در نظر گرفتن

[1] Control of network
[2] Control over network
[3] Input delay strategy/ method
[4] Linear matrix inequality

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

تأخیرهای شبکه، مدیریت و حذف بسته-داده‌ها، در دهه گذشته توسعه یافته‌اند. که در بخش‌های بعدی به‌طور مفصل به آنها پرداخته خواهد شد.

۱-۲-۱-۳- کنترل رویداد-محور

در این نوع سیستم کنترل، به‌جای اینکه از یک کمیت بنیادی ثابت استفاده شود، واکنش کنترلی با وقوع یک رویداد انجام می‌شود. از مزایای اصلی این نوع کنترل، می‌توان به کاهش منابع و کاهش تلاش کنترلی اشاره کرد. این نوع سیستم کنترل به موضوعی جذاب در حوزه NCS تبدیل شده است. هدف اصلی در این روش کنترل شبکه‌ای، پاسخ به شرایط تحریک‌پذیری است که سیستم کنترل تصمیم می‌گیرد که آیا یک تلاش کنترلی انجام بشود، یا خیر. روش‌های مختلفی مانند نرم اقلیدسی، نرم $\mathcal{L}_2$، کنترل ردیابی، کنترل بازخورد دینامیک خروجی، کنترل بهینه H_∞ و سیستم‌های چندعامله برای این نوع سیستم‌ها ارائه شده‌اند.

۱-۳- مزایا و معایب سیستم‌های کنترل شبکه‌ای

مزیّت‌های اصلی سیستم‌های کنترل شبکه‌ای به شرح زیر است:

۱- کاهش پیچیدگی سیستم: می‌توان پیچیدگی سیستم‌های کنترلی را با تشکیل شبکه ارتباطی کاهش داد. به کمک شبکه ارتباطی، داده‌های مربوط به چند فرآیند را می‌توان به راحتی از طریق یک سرور مورد پردازش قرار داد.

۲- اشتراک‌گذاری داده‌های شبکه: پارامترهای مربوط به فرآیند را می‌توان به راحتی با استفاده از شبکه‌های ارتباطی مبادله کرد که می‌تواند به طراحی الگوریتم‌های کنترل کمک کند.

۳- تصمیم‌گیری منطقی بر اساس اطلاعات: از اطلاعات جمع‌آوری شده در شبکه می‌توان برای تصمیم‌گیری هوشمندانه استفاده کرد.

۴- حذف تجهیزات سیمی: امروزه امکان انتقال داده‌ها به‌صورت بی‌سیم با سرعت بسیار بالا میان فرآیند و کنترل‌کننده وجود دارد. حسگر شبکه‌های بی‌سیم به اندازه کافی پیشرفته هستند تا کنترل بی‌سیم را به واقعیت تبدیل کنند.

۵- انعطاف‌پذیری و امکان‌پذیری[1]: در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای، حسگرها و محرک‌های بی‌سیم را می‌توان به راحتی جایگزین نمونه‌های سنتی کرد که هزینه نگهداری سیستم را کاهش می‌دهد. از این طریق توسعه و افزایش حسگرها، محرک‌ها و کنترل‌کننده‌ها نیز امکان‌پذیر است.

۶- داشتن رابط فیزیکی-سایبری برای اجرای کنترل از راه دور: NCS بستری را برای رابط فیزیکی-سایبری و اجرای فرامین کنترل از راه دور فراهم می‌کند.

با داشتن این مزایا، معایبی هم برای NCS شمارده شده است که عبارتند از:

۱- ناتوانی در تعیین زمان دریافت داده‌ها: زمانی که داده‌ها می‌رسد را نمی‌توان دقیقاً تعیین کرد، بنابراین نمی‌توان از نمونه‌برداری یکنواخت استفاده کرد.

۲- از دست رفتن یکپارچگی داده‌ها: داده‌ها ممکن است در طول فرآیند انتقال از بین بروند، بنابراین نمی‌توانند اطلاعات کامل را ارائه دهند.

۳- تأخیر در ارتباط: در NCSهایی که در فاصله دور قرار دارند، به دلیل تأخیر ارتباطی، ممکن است عمل کنترل به‌صورت فوری و بلادرنگ اجرا نشود.

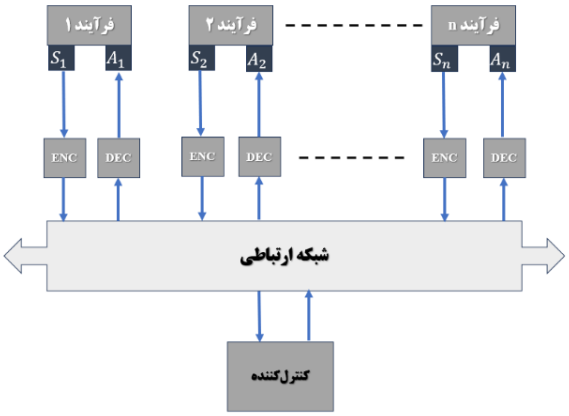
۴- پیچیدگی و ازدحام: با افزایش تعداد گره‌ها، به نوبه خود، پیچیدگی سیستم ارتباطی نیز افزایش می‌یابد و ممکن است باعث ازدحام و تأخیر زمانی شود.

۱-۴- ساختار سیستم‌های کنترل شبکه‌ای

به‌طور کلی، سه نوع ساختار در NCS وجود دارد که عبارتند از، ساختار متمرکز، ساختار غیرمتمرکز و ساختار توزیع شده که در ادامه شرح داده شده‌اند.

۱-۴-۱- ساختار متمرکز

این ساختار در شکل (۴) نشان داده شده است. در این ساختار، داده‌های اندازه‌گیری شده به یک کنترل‌کننده مرکزی برای ادغام اطلاعات و تصیم‌گیری متمرکز ارسال می‌شوند. در این ساختار، استفاده از روش‌های ترکیب داده[2] مناسب برای به‌دست آوردن داده‌های ترکیبی‌ای که برای پردازش عملیات و محاسبات استفاده می‌شوند، ضروری است.



شکل ۴: ساختار متمرکز برای سیستم کنترل شبکه‌ای

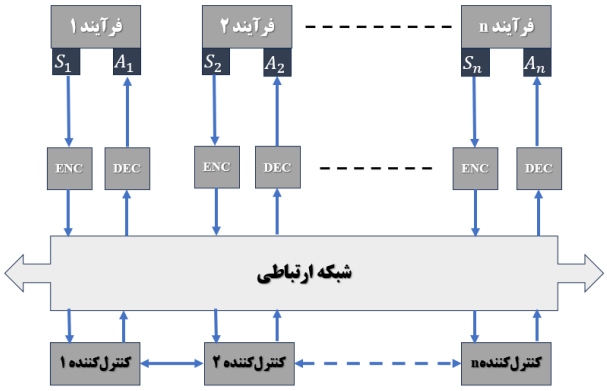
۱-۴-۲- ساختار غیرمتمرکز

شکل (۵) ساختار غیرمتمرکز کنترل شبکه‌ای را نشان می‌دهد. در این ساختار، هر گره فقط به اطلاعات محلی متکی است و هر کنترل‌کننده به‌صورت محلی عمل می‌کند. در این ساختار، گره‌ها اطلاعات خود را با یکدیگر به اشتراک نمی‌گذارند. این نوع ساختار باعث کاهش زمان تجزیه و تحلیل و صدور فرمان کنترل می‌شود.

[1] Flexibility and Feasibility

[2] Data fusion methods

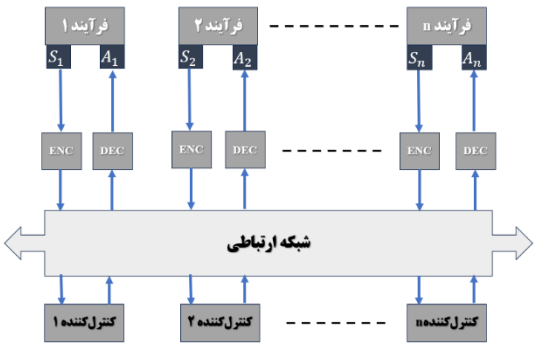
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]



شکل ۵: ساختار غیرمتمرکز

۳-۴-۱- ساختار توزیع شده

این ساختار در شکل (۶) نشان داده شده است. در این ساختار، هر کنترل کننده مجاز است اطلاعات محلی خود را با کنترل‌کننده‌های دیگر به اشتراک بگذارد. بنابراین، کنترل‌کننده‌ها می‌توانند رفتار خود را با ارسال یا دریافت اطلاعات از سایر کنترل‌کننده‌ها، هماهنگ کنند. دو ویژگی مهم این ساختار عبارتند از: ۱) اطلاعات زیرسیستم با کمک شبکه ارتباطی مشترک رد و بدل می‌شود، و ۲) فرآیند از تعداد کافی واحدهای تعاملی ساده تشکیل شده است که برای دستیابی به هدفی معین باهم هماهنگ می‌شوند. پودمانی (تکثیرپذیر) بودن[1]، مقیاس‌پذیری و مقاوم بودن از سایر ویژگی‌های این نوع ساختار در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای می‌باشد



شکل ٦: ساختار توزیع شده

۲- چالش‌های موجود در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای

تحلیل و ترکیب سیستم‌های کنترل شبکه‌ای، نیازمند یکپارچگی و هماهنگی در ارتباطات، محاسبات و اقدامات کنترلی می‌باشد. بنابراین، این سیستم‌ها ممکن است تعدادی مسائل چالش برانگیز را ایجاد کنند که در طرح‌های کنترل سنتی مورد توجه قرار نگرفته است. در طول دهه گذشته، محققان چندین روش سیستمی و مهندسی مانند روش‌های حوزه فرکانس، حوزه زمان، فضای حالت، کنترل مقاوم و کنترل تصادفی را توسعه داده‌اند و همچنین محققان علوم کامپیوتر و شبکه، پیشرفت‌های نوینی در نرم‌افزار سیستم، محاسبات پرسرعت و تکنولوژی‌های جدید شبکه‌ای داشته‌اند. اما با این حال، برخی مسائل اساسی در دنیای واقعی را باید حل کرد که ارتباطات، محاسبات و کنترل را به‌صورت سیستماتیک یکپارچه می‌کنند. در ادامه به شرح چالش‌های مهمی که در دهه اخیر معرفی شده‌اند پرداخته شده است.

۲-۱- چالش‌های مخابراتی

۲-۱-۱- تأخیر ارتباطی

تأخیر ارتباطی به تأخیر در هنگام انتقال و تبادل داده اشاره دارد. شبکه، وظیفه انتقال داده به تمامی گره‌های موجود در سیستم را بر عهده دارد. به دلیل پهنای باند محدود، گره‌ها فقط می‌توانند بر اساس روش اشتراک زمانی[2] به کانال ارتباطی دسترسی داشته باشند. انتقال و تبادل داده می‌تواند به دلیل ارسال همزمان توسط چندین گره، نامنظم شده و به خاطر ازدحام به تأخیر بیافتد. تأخیر به‌وجود آمده از سنسورها، کنترل‌کننده‌ها و محرک‌ها در فرآیند را تأخیر سیستم می‌گویند و مدت زمان ارسال بسته-داده‌ها در کانال‌های شبکه‌ای تأخیر کانال نامیده می‌شود. در تجهیزات پردازش مدرن با سرعت بالا، تأخیر دستگاه بسیار کمتر از تأخیر کانال ارتباطی است. مدت زمان تأخیر در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای همواره ثابت نبوده و متغیر با زمان یا تصادفی می‌باشد، که تأثیر منفی زیادی بر عملکرد آنها دارد، مانند: افزایش فراجهش، افزایش زمان صعود و زمان نشست طولانی‌تر. بنابراین به‌طور کلی، تأخیر شامل سه بخش است: تأخیر بازخورد از سنسورها به کنترل‌کننده τ_{sc}، تأخیر در ارسال اطلاعات کنترل‌کننده به محرک τ_{ca} و تأخیر محاسباتی کنترل‌کننده‌ها τ_c. کل تأخیر زمانی در NCSها را می‌توان به‌صورت $\tau = \tau_{sc} + \tau_{ca} + \tau_c$ محاسبه کرد. در اکثر فرآیندها اگر τ بزرگتر از پریود نمونه‌برداری T باشد، موجب نوسان در سیستم می‌شود.

۲-۱-۲- از دست رفتن داده[3]

به‌طور کلی داده‌ها در یک بسته داده، کدگذاری شده و منتقل می‌شوند. با توجه به محدودیت‌های مکانیسم‌های ارتباطی و منابع سخت‌افزاری، تصادم‌ها و وقفه‌های انتقال، اجتناب‌ناپذیر بوده و این موارد تحت عنوان از دست رفتن داده‌ها شناخته می‌شوند. از دست رفتن داده شامل دو نوع است: نوع غیرفعال یا پسیو و نوع فعال یا اکتیو. برخی از پروتکل‌های شبکه، به‌خاطر استفاده از مکانیسم ارسال مجدد، اگر زمان ارسال بسته از حداکثر محدودیت زمانی فراتر برود، بسته دور انداخته می‌شود. به این نوع از دست رفتن بسته اطلاعات، نوع غیرفعال یا پسیو می‌گویند. در نوع اکتیو، در طول مدت زمان انتقال بسته-داده‌ها، سیستم به‌طور خودکار بار شبکه را شناسایی می‌کند و برخی از بسته-داده‌های غیرواقعی را به‌طور فعال با استفاده از یک الگوریتم از پیش تعیین‌شده حذف می‌کند که دلیل آن جلوگیری از ازدحام شبکه می‌باشد. در برخی موارد، حذف بعضی از بسته‌های ورودی به سیستم کنترلی به‌طور هدفمند،

[1] Modularity
[2] time-shared technique
[3] Data loss

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

باعث حذف اغتشاش در NCS شود. صرف نظر از فعال یا غیرفعال بودن، از دست رفتن بسته‌ها[1] مانند برخی از داده‌های بازخورد مهم منجر به از دست رفتن داده‌ها می‌شود، که این امر منجر به کاهش کارایی NCS و ناپایداری فرآیند می‌شود [6].

در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای، از دست رفتن داده تحت تأثیر پروتکل‌های شبکه، شرایط بارگذاری و عوامل دیگر قرار می‌گیرد. بنابراین، معمولاً دارای ویژگی‌های تصادفی و ناگهانی بوده و درک منظم بودن خروجی بسته‌ها بسیار دشوار است. روش‌های قطعی و احتمالی به‌طور کلی برای توصیف از دست رفتن داده در شبکه‌ها استفاده می‌شود. روش‌های قطعی[2] از میانگین نرخ تلفات بسته یا حداکثر تلفات پیوسته بسته برای توصیف از دست رفتن داده‌ها استفاده می‌کنند و در روش‌های احتمالی[3] مانند فرآیند مارکوف، که از حالت‌های محدودی استفاده می‌کند، فرض می‌شود که از دست دادن بسته، دارای تابع توزیع احتمال خاصی می‌باشد. از توزیع برنولی نیز برای توصیف مدل از دست رفتن داده‌ها استفاده می‌شود [3].

۲-۱-۳- محدودیت دسترسی[4]

با توجه به محدودیت در انتقال داده، دسترسی همه سنسورها و محرک‌ها به کانال ارتباطی به‌طور پیوسته میسر نخواهد بود، و منجر به ایجاد یک مشکل جدید تحت عنوان محدودیت دسترسی خواهد شد. چنین محدودیتی توسط مکانیسم شناخته شده چند برابر کننده زمان[5] در انواع شبکه‌های فیلد باس[6] و مبتنی بر CAN رفع می‌شود. در مکانیسم چند برابر کننده زمان، زمان در کانال ارتباطی تکه تکه شده و فقط برخی از گره‌ها مجازند به شبکه مطابق با پروتکل کنترل دسترسی به کانال (MAC)[7] ارتباط برقرار کنند، که این کار ممکن است به‌صورت تصادفی یا قطعی انجام شود.

۲-۱-۴- محو شدن کانال

در ارتباطات بی‌سیم، انحرافاتی که بر روی سیگنال‌ها تأثیر و آن‌ها را تضعیف می‌کند، تحت عنوان محوشدگی کانال[8] شناخته می‌شود. محو شدن ممکن است متناسب با زمان، موقعیت جغرافیایی یا فرکانس رادیویی تغییر کند، و اغلب به‌صورت یک فرآیند تصادفی مدل‌سازی می‌شود [4]. معمولاً موانعی که در مسیر انتقال سیگنال‌های بی‌سیم (مانند ساختمان‌های مرتفع یا تپه‌ها) وجود دارد، باعث انعکاس و شکست‌های متعدد در فرآیند انتقال سیگنال بی‌سیم می‌شود. بنابراین سیگنال دریافتی، ترکیبی از یک موج مستقیم، یک موج بازتابی چندگانه و یک موج شکسته است. از آنجایی که قدرت سیگنال و زمان انتشار آن در هر مسیر متفاوت است، سیگنال دریافتی ممکن است در دامنه، فاز یا شکل موج تغییر کرده و ایجاد اعوجاج کند. این امر منجر به کاهش کیفیت سیگنال شده و کارایی ارتباطات دیجیتال را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد [6].

۲-۱-۵- محدودیت توان[9]

امروزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN)[10] به دلیل انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم و سهولت در نصب مورد استقبال قرار گرفته‌اند. در WSN، معمولاً سنسور با توان محدود توسط باتری تغذیه می‌شود و تعویض باتری در حین کار WSN دشوار است. از این رو، در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای بی‌سیم (WNCS) توجه بیشتری به محدودیت توان می‌شود. در [7] گزارش شده است که بیشترین نیرو در فرآیند انتقال سیگنال مصرف می‌شود. کاهش سرعت انتقال و اندازه بسته برای صرفه‌جویی در توان انتقالی موثر می‌باشد.

۲-۱-۶- امنیت شبکه

مسائل امنیت شبکه یکی دیگر از شاخه‌های تحقیقاتی در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای می‌باشد که مورد توجه محققان است. در چند سال گذشته، حملات سایبری، توجه کثیری را به خود جلب کرد. هکرها می‌توانند انواع مختلفی از حملات را بر روی اجزای مختلف NCS انجام دهند. به‌طور کلی حملات اصلی به شبکه شامل: حملات انکار سرویس (DoS)[11] و حملات تزریق داده نادرست (FDI)[12] می‌باشد. انواع حملات هکرها به خودروهای هوشمند گزارش شده است. در سال ۲۰۱۵، دو هکر در ایالات متحده با استفاده اینترنت، به سیستم الکترونیکی یک خودروی جیپ حمله کردند که منجر به برخورد خودرو به موانع کنار جاده شد. در موردی دیگر در سال ۲۰۱۷، یک ویروس اخاذی در سرتاسر جهان، به‌ویژه در دانشگاه‌ها پخش شد.

۲-۲- چالش‌های محاسباتی

محاسبات در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای به نوع ارتباطات و کنترل در آنها بستگی دارد. پیچیدگی محاسباتی با الگوریتم‌های مدل‌سازی و کنترل شبکه متفاوت است. به‌طور کلی، چالش‌های محاسباتی در NCSها از مواردی که در ادامه ذکر خواهد شد، ناشی می‌شود.

۲-۲-۱- مدل‌سازی شبکه ارتباطی

برخی از کارهای انجام گرفته در تجزیه و تحلیل سیستم‌های کنترل شبکه‌ای بر این فرض استوار هستند که محدودیت‌های ناشی از شبکه، مانند تأخیرها و حذف بسته-داده‌ها، تنها در ارسال اطلاعات از حسگر به کنترل‌کننده رخ می‌دهد و شبکه ارتباطی به‌صورت یک پیوند یک طرفه مدل‌سازی می‌شود. در حالی‌که، ممکن است این اثرات در پیوند ارتباطی کنترل‌کننده به محرک نیز ایجاد شده، و بر عملکرد سیستم کنترل تأثیر بگذارد، که معمولاً ناشناخته بوده و شناسایی آن‌ها در عمل دشوار است.

[1] Packet loss
[2] Deterministic methods
[3] Stochastic methods
[4] Medium access constraint
[5] Time-multiplexing
[6] Fieldbus
[7] Media access control
[8] Channel fading
[9] Power constraint
[10] Wireless sensor networks
[11] Denial-of-service
[12] False data injection

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

در نتیجه، یک چارچوب مدل‌سازی کلی‌تر از شبکه‌های ارتباطی برای کانال‌های انتقال دوجانبه در NCS مورد نیاز است، که در هر حال بار محاسبات را افزایش می‌دهد [8].

۲-۲-۲- توپولوژی شبکه ارتباطی

پیچیدگی ناشی از ساختار سیستم، مانند افزایش تعامل بین زیر سیستم‌ها، افزایش ابعاد زیر سیستم، افزایش تعداد اجزای سیستم (سنسورها، کنترل‌کننده‌ها و محرک‌ها) باعث افزایش عدم‌قطعیت سیستم خواهد شد. همچنین پیوندهای بیشتر بین گره‌ها از طریق شبکه‌های ارتباطی باعث پیچیدگی محاسباتی بیشتر می‌شود. لذا استفاده از توپولوژی شبکه‌ای بهینه و مؤثر ضروری است.

۲-۲-۳- الگوریتم کنترلی

حل مسائل کنترل سیستم‌ها تحت شبکه نیازمند استفاده از الگوریتم‌های کنترلی مختلف می‌باشند. میزان پیچیدگی محاسبات با اتخاذ الگوریتم‌های کنترلی مختلف، تغییر می‌کند.

۲-۳- چالش‌های کنترلی

الگوریتم‌های کنترل قدیمی معمولاً بر اساس فرض‌های ضمنی، منابع محاسباتی نامحدود، بی‌تأثیر از تأخیر و با پهنای باند نامحدود طراحی و تست می‌شدند. طرح‌های کنترل سنتی عمدتاً بر روی ایجاد مصالحه بین کارایی کنترل و پیچیدگی محاسبات تمرکز دارند. اما، محاسبات و منابع ارتباطی در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای محدود بوده و اغلب، داده‌ها بین چندین شاخه خاص (مانند زیرسیستم‌ها، گره‌ها و سایر فرآیندها) به اشتراک گذاشته می‌شوند. بنابراین، توسعه الگوریتم‌های کنترل بلادرنگ در NCS باید با ادغام ارتباطات، محاسبات و کنترل محقق و مجدداً ارزیابی شود، تا به کارایی کنترلی مطلوب دست یابد. بهبود معماری و پروتکل‌های ارتباطی برای افزایش قابلیت اطمینان یکی از این گزینه‌ها می‌باشد [8]. توسعه و معرفی الگوریتم‌های جدید کنترلی برای انجام محاسبات و چالش‌های ارتباطی نیز الزامیست. دو چالش مهم کنترلی در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای در ادامه تشریح شده‌اند.

۲-۳-۱- عدم قطعیت در کانال‌های متغیر با زمان

قسمتی از تحقیقات کنونی در NCSها، کدگذاری بازخورد کنترلی در کانال‌های با محدودیت‌های ارتباطی است، که معمولاً کنترل کوانتیزه[1] نامیده می‌شود [2]. کنترل کوانتیزه، موضوعی قدیمی و مربوط به سال ۱۹۵۶ [9] می‌باشد که اثر کوانتیزاسیون در نمونه‌برداری‌های یک سیستم مورد مطالعه قرار گرفت. اگر یک کنترل‌کننده پایدارکننده با استفاده از یک کوانتیزه‌گر الفبای-محدود[2] کوانتیزه شود، سیستم تحت تأثیر سیکل حدی[3] و رفتارهای آشفته[4] قرار می‌گیرد. در [10] اثبات شده است که وجود نرخ بسیار کمی از داده، برای تولید فرامین کنترل، به‌منظور دستیابی به پایداری در یک سیستم خطی حلقه-باز ناپایدار وجود دارد. استفاده از کوانتیزه‌گر منجر به دو پدیده اشباع و کاهش کارایی سیستم در اطراف نقطه تعادل خواهد شد، که ممکن است منتهی به ناپایداری شود. تحقیقات بسیاری در خصوص بازخورد کوانتیزه شده، بسته به اینکه نوع کوانتیزه‌گر ایستا یا پویا (دینامیکی)[5] باشد گزارش شده‌اند. کوانتیزه‌گر لگاریتمی و هیسترزیس[6] نوعی کوانیزه‌گر ایستا و کوانتیزه‌گر یکنواخت[7] از نوع دینامیکی می‌باشد [4]. کنترل کوانتیزه ممکن است شامل یک مجموعه محدود یا نامتناهی از سطوح کنترلی باشد. کوانتیزه‌گرهای ایستا تنها در صورتی می‌توانند به پایداری مجانبی[8] دست یابند که نامحدود باشند و دقت خوبی در نزدیکی مبدأ داشته باشند. دستیابی به پایداری مجانبی با کوانتیزه‌گرهای دینامیکی، حتی در صورتی که سیگنال کنترل محدود باشد امکان‌پذیر است [2].

۲-۳-۲- نویز و خطاهای بیت

تولید خطاهای بیت[9] در مقادیر کنترلی بازخورد کوانتیزه شده که از یک کنترل‌کننده از طریق یک کانال بازخورد نویزدار به فرآیند منتقل می‌شود، اغلب به‌طور تصادفی رخ می‌دهد که عملکرد فرآیند را مختل می‌کند. میزان این تأثیرات به عوامل مختلفی چون مقدار نویز کانال بستگی دارد. اگر کانال نویز داشته باشد و خطاهای بیتی به‌طور مکرر رخ دهد، پایداری سیستم حلقه-بسته به‌طور قطع از بین می‌رود [2]

۳- روش‌ها و راه‌کارها در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای

در این بخش، برخی ابزار و روش‌های مدل‌سازی، تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل شبکه‌ای به‌طور خلاصه بررسی می‌شود.

۳-۱- نظریه گراف

پیدایش کنترل شبکه‌ای، باعث رونق زمینه‌های تحقیقاتی در سیستم‌های چندعاملی[10] شد [11]. سیستم‌های چندعاملی، از تعداد زیادی گره یا عامل[11]هایی تشکیل شده‌اند که توسط پیوندها به هم متصل می‌شوند و به عنوان یک رویکرد کلیدی در درک سیستم‌های توزیع شده مورد مطالعه قرار می‌گیرند [12]. یکی از مشکلات سیستم‌های چندعاملی، اجماع این سیستم‌هاست، که همه عوامل شبکه را ملزم می‌کند تا - با استفاده از داده‌های به اشتراک گذاشته شده از طریق ارتباطات محلی - در مورد تعدادی تصمیم/ محاسبات به توافق برسند. برای رسیدن به این هدف، گام کلیدی، طراحی یک استراتژی کنترلی مناسب مبتنی بر شبکه است به‌طوری که با گذشت زمان، همه عوامل به‌طور مجانبی به اجماع برسند. مطالعات در خصوص اجماع زمان پیوسته غالباً با استفاده از ماتریس

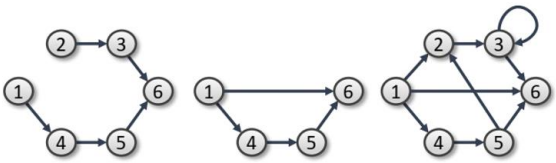
[1] Quantized control
[2] Finite-alphabet quantizer
[3] Limit cycle
[4] Chaotic behavior
[5] Static or dynamic quantizer
[6] logarithmic and hysteresis quantizer
[7] Uniform quantizer
[8] Asymptotic stability
[9] Bit errors
[10] Multi-agent systems (MAS)
[11] Agents

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

لاپلاسین گراف[1] بوده و برای عامل‌های زمان-گسسته، ماتریس پرون[2] استفاده می‌شود، که به ابزارهای مناسب تحلیل و طراحی سیستم کنترل تبدیل شده‌اند. برای مدل‌سازی تعاملات بین عوامل، از نظریه گراف استفاده می‌شود [13]. در ادامه انوع گراف‌های مهم که در کنترل شبکه‌ای به‌کار می‌رود، معرفی می‌شوند.

۳-۱-۱- گراف‌های جهت‌دار

از گراف جهت‌دار $\varsigma=(\nu,\varepsilon)$ برای نشان دادن واکنش میان عامل‌ها استفاده می‌شود [11]. $\nu=\{1,2,...,N\}$، معرف مجموعه گره‌هاست که در آن، N نشانگر تعداد عامل‌هاست. $\varepsilon\subseteq\nu\times\nu$، معرف مجموعه یال‌ها (لبه‌ها) با جفت گره‌های (رئوس) متناظر بوده و بیان‌گر نحوه تبادل داده میان عامل‌ها می‌باشد. یال $(i,j)\in\varepsilon$ نشان‌دهنده تبادل داده میان عامل i و j بوده که i گره مبدأ و j گره مقصد می‌باشد. مجموعه همسایگی عامل iام به‌صورت $\mathrm{N}_i=\{j\in\nu\,|\,(i,j)\in\varepsilon\}$ تعریف می‌شود. حداقل درجه نسبی گراف ς به‌صورت $d_{\min}(\varsigma)=\min_{i\in\nu}d_i$ تعریف می‌شود، که در آن $d_i=\sum_j\omega_{ji}$ می‌باشد. اگر $(i,i)\in\varepsilon$ وجود داشته باشد، می‌گویند i یک حلقه متقابل[3] دارد و در تعیین درجه i، محاسبه نمی‌شود. زیرگراف ς به‌صورت $\bar{\varsigma}=(\bar{\nu},\bar{\varepsilon})$ نمایش داده می‌شود که $\bar{\nu}\subseteq\nu$ و $\bar{\varepsilon}\subseteq\varepsilon$ می‌باشد. یک زیرگراف در صورتی از نوع القائی[4] نامیده می‌شود که با حذف تعدادی گره از ς به‌دست آمده باشد، به‌طوری‌که یال‌هایی که به آن گره وارد و خارج می‌شوند، نیز حذف شده و یال‌های دیگر باقی بماند. زیرگراف H اگر شامل تمام رئوس ς باشد، یعنی $\bar{\nu}=\nu$، زیرگراف پوشا[5] نامیده می‌شود. نمونه‌ای از یک گراف ς به همراه زیرگراف القائی و پوشای آن در شکل (۷) نشان داده شده است. اگر $(i,j)\in\varepsilon$ باشد، ماتریس الحاقی $[A_{adj}]_{ii}=0$ و $[A_{adj}]_{ij}=1$ بوده و در غیر این‌صورت $[A_{adj}]_{ij}=0$ می‌باشد. اگر A_{adj} متقارن باشد، ς گراف غیرجهت‌دار نامیده می‌شود [14].



(الف) (ب) (ج)

شکل ۷. دیاگرام الف) یک گراف، ب) گراف القائی، ج) گراف پوشا

۳-۱-۲- گراف تصادفی

در یک گراف تصادفی با N عامل، امکان وجود یک یال بین یک جفت رئوس در مجموعه $\nu=\{1,2,...,N\}$، با فرض تصادفی و مستقل بودن آن از سایر یال‌ها با احتمال $p\in(0,1]$ تعیین می‌شود. فضای نمونه[6] تمام گراف‌های تصادفی با $\varsigma(N,p)$ نمایش داده می‌شود و همچنین مقدار احتمال p برای تمام یال‌های $G\in\varsigma(n;p)$ یکسان فرض می‌شود. احتمال یال[7] می‌تواند مقدار ثابت، یا در سناریوهای جالب‌تر، تابعی از درجه گراف باشد ($p(n)$). در مدل‌سازی گراف تصادفی، تمام پارامترهای گراف به‌صورت احتمالی توصیف می‌شوند. ابعاد یک گراف تصادفی با $\varsigma(n;p)$ به‌صورت تعداد یال‌های یک متغیر تصادفی $G\in\varsigma(n;p)$ در نظر گرفته می‌شود [15,16].

استفاده از ماتریس لاپلاسین یکی از روش‌های مؤثر در نظریه گراف است که در تحلیل و طراحی شبکه‌های پیچیده در NCS نیز کاربرد دارد [17,18]. ماتریس لاپلاسین برای توصیف توپولوژی گراف به‌کار گرفته شده و بسته به نوع ورودی‌های آن به سه دسته طبقه‌بندی می‌شود: ماتریس لاپلاسین مرسوم (ورودی‌های قطر اصلی غیرمنفی و ورودی‌های قطر فرعی غیرمثبت)، ماتریس لاپلاسین علامت (ورودهای واقعی دلخواه)، و ماتریس لاپلاسین پیچیده (ورودهای پیچیده دلخواه) [19]. نوع لاپلاسین در مدل‌سازی و حل مجموعه متفاوتی از مسائل سیستم‌های کنترل چندعاملی مؤثر است و ویژگی‌های جبری آنها در مشخص کردن پایداری و کارایی الگوریتم‌های محاسباتی اهمیّت بسزایی دارد.

۳-۲- کنترل پیش‌آمد-محور

ویژگی بارز سیستم‌های کنترل شبکه‌ای این است که فرآیند فیزیکی به‌صورت زمان پیوسته و شبکه کنترلی بر اساس منطق دیجیتال و زمان-گسسته عمل می‌کند. بنابراین، نیاز به استفاده از روش‌های مدل‌سازی و کنترل سیستم ترکیبی جدید در طراحی NCS ضروری است. یکی از مشکلات اصلی در طراحی و تحلیل NCSها موضوع زمان‌بندی است که برای حل آن، دو مکانیسم زمان-تحریک[8] و رویداد-تحریک[9] معرفی شده است [8].

۳-۲-۱- زمان-تحریک

مکانیسم‌های زمان-تحریک، بر این فرض استوارند که تبادل اطلاعات در یک حلقه کنترلی به‌صورت از پیش تعیین شده میان حسگرها، کنترل‌کننده‌ها و محرک‌ها در یک شبکه ارتباطی انجام می‌شود. در این حالت، نمونه‌برداری و انتقال داده از طریق شبکه توسط کِلاک[10] در زمان‌های خاص انجام می‌شود. به‌طور کلی، مکانیسم زمان-تحریک بر اساس سه نوع نمونه‌برداری مختلف اجرا می‌شود: نمونه‌برداری دوره‌ای[11] (ثابت)، نمونه‌برداری متغیر با زمان (غیریکنواخت) و نمونه‌برداری تصادفی [8].

[1] Laplacian matrix theory
[2] Perron matrix theory
[3] Self-loop
[4] Induced subgraph
[5] Spanning subgraph
[6] Sample space
[7] Edge probability
[8] Time-triggered
[9] Event-triggered
[10] Clock
[11] Periodic sampling

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

۳-۲-۲- رویداد-تحریک

مکانیسم رویداد-تحریک، یک روش نشأت گرفته از طبیعت است، بدین معنا که، اجرای فرمان کنترل به یک رویداد بستگی دارد، و نه سپری شدن یک دوره زمانی ثابت. در این مکانیسم، از مولد رویداد[1] برای تشخیص اینکه آیا یک رویداد قبل از اجرای فرمان کنترل واقع شده است یا خیر، استفاده می‌شود. در NCSها، مولد رویداد معمولاً قبل از حسگر تعبیه می‌شود تا تصمیم گیرد که آیا سیگنال جاری نمونه‌برداری شود یا خیر، که این کار منجر به نمونه‌برداری رویداد-تحریک[2] می‌شود. همچنین، مولد رویداد می‌تواند بعد از حسگر تعبیه شود تا تعیین کند آیا سیگنال‌های نمونه‌برداری شده به شبکه ارتباطی ارسال شوند یا خیر، که منجر به انتقال رویداد-تحریک[3] می‌شود [20].

در [21]، یک بررسی دقیق از برخی نتایج اخیر در اجماع ناشی از رویداد-تحریک در سیستم‌های چندعاملی که در معرض اشباع محرک هستند ارائه شده است. نتایج گزارش شده در مقالات اخیر بر اساس روش‌های بازخورد بهره-محدود[4]، شرایط کران‌دار و مدل‌های محدب هستند. به تازگی طرحی جدید از رویداد-تحریک برای پایداری دسته‌ای از سیستم‌های خطی با تأخیر زمانی پیشنهاد شده است [22]. با استفاده از نابرابری ماتریسی جدید تحت عنوان Halanay[5] و با استفاده از تابع لیاپانف، شروط کافی برای طراحی بهره کنترل‌کننده و انتخاب پارامترهایی برای اجرای طرح پیشنهادی به‌دست می‌آید، تا پایداری نمایی سیستم حلقه-بسته را تضمین کند. همچنین، در [23] یک طرح جدید مبتنی بر تابع لیاپانف برای سیستم‌های خطی با مکانیسم رویداد-تحریک ارائه شده است، که برخلاف موارد مشابه، مکانیسم پیشنهادی مستقیماً با مشتق تابع لیاپانف به‌جای محاسبه کران بالای تأخیر، سروکار دارد. کنترل رویداد-تحریک پیش‌بین مدل (ETPC)[6] نمونه‌ی تعمیم یافته دیگری در این رویکرد است که در [24] پیشنهاد شده است.

۳-۳- رویکرد لیفتینگ (بلند کردن)

روش بلند کردن[7]، ابزاری مهم در کنترل سیستم‌های خطی با نمونه‌برداری‌های دوره‌ایست، که میان اجزاء گسسته و پیوسته فرآیند ارتباط ایجاد می‌کند. در کنار روش بلند کردن، از نابرابری‌های ماتریسی خطی نیز در طراحی کنترل‌کننده، زمانی که نمونه‌بردار و نگه‌دارنده[8] تحت نرخ تناسب‌پذیر[9] باشند، استفاده می‌شود [4]. در دو سال گذشته، نتایج اصلی به‌دست آمده به زمینه حسگرهای چندگانه برای حل مسئله نمونه‌برداری چند نرخی تعمیم داده شده است. چنین راه‌حل‌هایی از نظر محاسباتی پیچیده هستند، زیرا شامل ارزیابی تعداد زیادی ماتریس می‌شوند. تحقیقات مرتبط در [28-25] گزارش شده است.

۳-۴- رویکرد ترکیبی

این رویکرد مبتنی بر نمایش یک سیستم در مدل گسسته/ پیوسته (ترکیبی) یا به عبارت دقیق‌تر، تکانه‌ای[10] است که برای اولین بار از حل معادلات دیفرانسیل ریکاتی همراه با جهش به‌دست آمد [29]. امروزه رویکرد سیستم ترکیبی در کنترل مقاوم H_∞ با استفاده از داده‌های نمونه‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد [30]. مدل‌سازی سیستم ترکیبی می‌تواند با استفاده از توابع جدید لیاپانف و به‌صورت زمان-گسسته انجام گیرد [31]. برای مثال، سیستم LTI[11] زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_u u(t) \qquad (۱)$$

که در آن، x و u به ترتیب متغیرهای حالت و ورودی‌های فرآیند می‌باشند. زمان نمونه‌برداری با s_k نمایش داده شده و $\varepsilon \le s_k - s_{k-1} \le -\tau_{MATI}$ در نظر گرفته می‌شود، به‌طوری که ε و τ_{MATI} اسکالرهای مثبت هستند. در این‌صورت، کنترل بازخورد حالت خطی به‌صورت $u(t) = -kx(s_k)$ تعریف می‌شود. متغیر حالت جدید به‌صورت $\zeta_t = [x^T(t)\ Z^T(t)]^T$ تعریف می‌شود، که در آن $Z(t) = x(s_k)$ می‌باشد. دینامیک سیستم (۱) می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

$$\begin{cases} \dot{\zeta}(t) = F\zeta(t), t \ne s_k \\ \zeta(s_k) = \begin{bmatrix} x(s_k^-) \\ x(s_k^-) \end{bmatrix}, t = s_k \end{cases} \qquad (۲)$$

به‌طوری که $F = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ و $B = B_u k$ می‌باشد.

در [32,33]، کنترل تکانه‌ای رخداد-تحریک (ETIC)[12] در سیستم‌های ترکیبی غیرخطی با در نظر گرفتن تأخیر زمانی معرفی شده است و همچنین پایداری ورودی به حالت (ISS)[13] و پایداری ورودی به حالت انتگرالی (iISS)[14] برای دو کاربرد وسایل نقلیه (متحرک‌های) متصل خودران ($CAVs$)[15] و ریزشبکه‌های جزیره شده مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳-۵- رویکرد ورودی تأخیردار

مدل‌سازی سیستم‌های زمان پیوسته با کنترل دیجیتال با در نظر گرفتن ورودی کنترل تأخیردار در [34] و [35] و بعدها در [36] ارائه شد. در این رویکرد، معادله حلقه-بسته به یک معادله دیفرانسیل دارای تأخیر با ابعاد نامحدود[16] (ID-DDE) تبدیل می‌شود و پایداری با استفاده از قضایای

[1] Event-generator
[2] Event-triggered sampling
[3] Event-triggered transmission
[4] low-gain feedback
[5] Halanay-Type matrix Inequality
[6] Event-triggered predictive control
[7] Lifting approach
[8] Holder
[9] Commensurable rate
[10] Impulsive
[11] Linear time invariant
[12] event-triggered impulsive control
[13] input-to-state stability
[14] integral input-to-state stability
[15] connected autonomous vehicles
[16] Infinite-dimensional delay differential equation

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

رازومیخین و لیاپانف تضمین می‌شود. قانون کنترل دیجیتال با استفاده از رابطه زیر به‌صورت قانون کنترل تأخیردار نوشته می‌شود:

$$u(t)=u_d(t)= \\ u_d(t-(t-t_k)), t_k \le t \le t_k+1, \tau(t)=t-t_k \qquad (۳)$$

سپس، می‌توان سیستم LTI (۱) را $\dot{x}(t)=Ax(t)+B_u u(t-\tau(t))$ بازنویسی کرد. رویکرد ماتریس وزن‌دهی آزاد[1] [37]، رویکرد نابرابری جنسن[2] [38] و رویکرد نابرابری ویرتینگر[3] [39]، نمونه‌های تعمیم داده شده رویکرد ورودی تأخیردار می‌باشند. در [40,41] نمونه‌های تعمیم یافته جدید از نابرابری‌های جنسن و ویرتینگر ارائه شده‌اند.

۳-۶- رویکرد کنترل مقاوم

هنگامی که یک پریود (دوره) نمونه‌برداری متغیر با زمان در سیستم‌های کنترل اعمال می‌شود، معادل زمان گسسته آن اساساً یک سیستم متغیر با زمان خواهد بود. برای درک بهتر، یک سیستم زمان پیوسته به‌صورت $\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)$ با ورودی کنترل $u(t)=kx(t_k), \forall t \in [t_k, t_k+1]$ را درنظر بگیرید. در این‌صورت، سیستم زمان-گسسته معادل با زمان نمونه‌برداری $T_k=t_{k+1}-t_k$ ، به‌صورت $x(t_{k+1})=G(T_k)x(t_k)$ نوشته می‌شود، که در آن $G(T_k)=\exp(AT_k)+(\int_0^T \exp(Ar)Bdr)$ می‌باشد. شرط کافی جهت پایداری مجانبی سیستم حلقه-بسته زمان-گسسته، یافتن $P=P^T>0$ می‌باشد، به‌طوری‌که $G^T(T)PG(T)<0, \forall T_k$ شود. پیدا کردن چنین شروطی برای زمان‌های نمونه‌برداری (T) ثابت راحت است. اما در مقابل، برای نمونه‌برداری‌های متغیر با زمان به‌طوری‌که $T_{\min} \le T_k \le T_{\max}$ باشد، بررسی شروط پایداری مشکل است. $G(k)$ را می‌توان به $G(T_{nom})+\Delta Q(T_{nom})$ تبدیل کرد، که در آن T_{nom} مقداری ثابت انتخاب می‌شود. با انجام این کار، $G(T_{nom})$ تبدیل به یک ماتریس ثابت می‌شود، و عبارت $\Delta Q(T_{nom})$ که ناشی از تغییرات زمان نمونه‌برداری است به‌عنوان عدم‌قطعیت با نرم محدود توصیف می‌شود. با استفاده از این روش، سیستم حلقه-بسته با نایقینی نرمالیزه شده پایدار است. تحقیقات اخیر در زمینه رویکرد مقاوم، عمدتاً بر چگونگی تخمین نایقینی با شروط محافظه‌کارانه متمرکز می‌باشد. برخی از روش‌ها مانند اتساع ماتریس[4] و مجموع مربعات (SoS)[5] برای دستیابی به شرایط پایداری با محافظه‌کاری کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [4].

اخیراً، تحلیل پایداری و طراحی در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای با وجود نایقینی و تأخیر در انتقال داده توسط یک روش جدید مبتنی بر چندجمله‌ای درجه دوم منفی معین[6] بررسی شده است [42]. برای این منظور از یک تابع جدید لیاپانف با تأخیر ضربی[7] برای بهره‌برداری بیشتر از تحدب تأخیر اطلاعات[8] ارائه شده است و به این واسطه، شرایط پایداری به‌دست آمده است. کلیت و اثربخشی این روش روی یک هلیکوپتر آزمایشگاهی با دو درجه آزادی بررسی شده است [42]. در [43,44] نیز به کنترل بازخورد غیرمتمرکز مقاوم H∞ در NCSهای مقیاس بزرگ پرداخته شده است. شرایط محافظه‌کارانه کمتر در شکل نابرابری ماتریسی غیرمحدب[9] فرموله شده که می‌تواند با حل یک مسئله بهینه‌سازی با استفاده از LMIها ایجاد شود. در [45] نیز رویکرد کنترل H∞ تطبیقی زمان-محدود[10] بر روی یک شبکه *TCP* توسعه داده شده و راه‌حل جدیدی برای حل مشکل کنترل ازدحام داده ارائه شده است.

۳-۷- رویکرد سیستم سوئیچ شونده

استفاده از سیستم سوئیچ شونده[11]، روشی دیگر برای طراحی سیستم‌های کنترل با داده‌های نمونه‌برداری شده می‌باشد. برای این منظور، سیستم $\dot{x}(t)=A_c x(t)+B_c u(t)$ در نظر گرفته شده، و فرض می‌شود پریود نمونه‌برداری $T_k=t_{k+1}-t_k$ دارای مقادیر محدودی است. به‌طور دقیق‌تر، $T_k=n_k T_0$ بوده به‌طوری‌که $n_k \in \{i_1,...,i_N\}$ یعنی $1 \le i_1 < i_2 < ... < i_N$ است و T_0 به‌عنوان پریود نمونه‌برداری پایه اتخاذ می‌گردد. در این حالت سیستم زمان-گسسته به‌صورت زیر توصیف می‌گردد:

$$\begin{aligned} &x(t_k+1)=A(T_k)x(t_k)+B(T_k)u(T_k) \\ &A(h_k)=e^{A_c T_k}=e^{A_c n_k T_0}=(e^{A_p T_0})^{n_k}=A_0^{n_k} \\ &B(T_k)=\int_0^{n_k T_0} e^{A_c r} dr B_c= \\ &\quad (\sum_{i=0}^{n_k-1}\int_{iT_0}^{(i+1)} e^{A_c r}dr)B_c=\sum_{i=0}^{n_k-1} A_0^i B_0 \\ &A_0=e^{A_c T_0}, B_0=\int_0^{T_0} e^{A_c r} dr B_c \end{aligned} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، $A(T_k)$ و $B(T_k)$ صراحتاً به n_k وابسته هستند که در فواصل مختلف نمونه‌برداری متفاوت بوده و N مقدار ممکن دارد. با تعیین سیگنال تکه‌ای[12] $n_k=\rho(k)$، سیستم زمان-گسسته فوق (۴)، یک سیستم خطی سوئیچ شونده با زیرسیستم‌های محدود خواهد شد. از میانگین زمان اقامت[13] در مدل سیستم سوئیچ شونده، برای تجزیه و تحلیل پایداری و طراحی کنترل‌کننده استفاده می‌شود. برای کاهش شرایط محافظه‌کارانه در طراحی، روشی تحت عنوان زمان ساکن وابسته به حالت[14] نیز پیشنهاد شده است [46].

در [47]، به مسأله پایداری سیستم‌های خطی سوئیچ شونده با کلیدزنی غیرهمزمان پرداخته شده است. از روش میانگین زمان اقامت وابسته به حالت برای طراحی سیگنال کلیدزنی استفاده شده، که تحت این سیگنال

[1] Free weighting matrix approach
[2] Jensen's inequality approach
[3] Wirtinger's inequality approach
[4] Matrix-dilation technique
[5] Sum of Squares (SoS)
[6] Quadratic polynomial negative-definite method
[7] delay-product LKF
[8] delay convexity information
[9] Nonconvex matrix inequalities
[10] Finite-time
[11] Switched system approach
[12] Piecewise signal
[13] Dwell time scheme
[14] Mode-dependent average dwell time approach

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

کلیدزنی، کران بالای تأخیر کلیدزنی غیرهمزمان حذف می‌شود. یکی از مدل‌های محبوب دیگر در این رویکرد، مدل PWA[1] می‌باشد. نمونه‌های مشابه دیگر نیز در [48,49] ارائه شده‌اند.

۳-۸- رویکرد زنجیره مارکوف

با توجه به‌این‌که دوره‌های نمونه‌برداری مختلف ممکن است تصادفی باشد، می‌توان از نظریه زنجیره مارکوف[2] برای بررسی آن استفاده کرد. نحوه مدل‌سازی در این رویکرد مشابه رویکرد سیستم سوئیچ شونده است و تنها تفاوت آن در انتقال زیرسیستم‌های مختلف است که از پردازش مارکوفین استفاده می‌کنند [50]. در مواردی از کنترل‌کننده H_∞ توزیع شده در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای با نمونه‌برداری تصادفی استفاده می‌شود که انتقال پریود نمونه‌برداری به‌صورت فرآیند مارکوفین در نظر گرفته می‌شود. سپس، از سیستم مارکوفین در تحلیل پایداری سیستم حلقه-بسته استفاده می‌شود [51].

[52] به کنترل حالت‌های سیستم از طریق یک شبکه ارتباطی با پهنای باند محدود پرداخته است. برای این منظور، از کنترل چندحالته خود-تحریک برای سیستم‌های با پرش مارکوف استفاده شده است. با معرفی مقادیری معین، یک الگوریتم حل برای به‌دست آوردن بهره‌های کنترل‌کننده چندحالته خود-تحریک معرفی شده، که پایداری سیستم حلقه-بسته را تضمین می‌کند.

۳-۹- رویکرد مبتنی بر نظریه اطلاعات

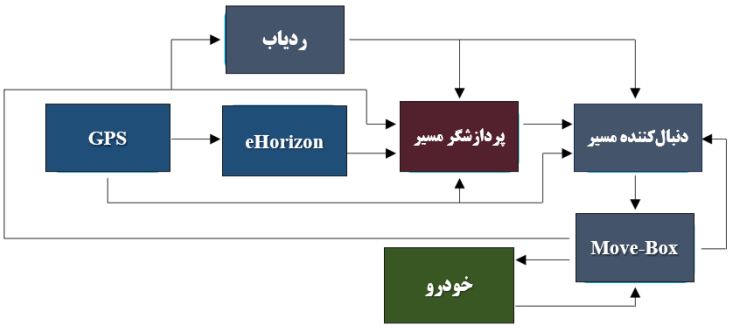
بررسی سیستم‌های کنترل شبکه‌ای بدون داشتن اطلاعات از وضعیت کانال ارتباطی امکان‌پذیر نیست. ظرفیت کانال یک شاخص بسیار مهم در نظریه اطلاعات است. در دهه گذشته، محققان سعی کرده‌اند نقش کانال در NCSها را از دیدگاه نظریه اطلاعات مورد مطالعه قرار دهند. دو مسئله اصلی در این زمینه مطرح است: ۱) بررسی نحوه تأثیر کانال بر کارایی سیستم کنترل، و ۲) ظرفیت لازم در کانال ارتباطی برای تضمین پایداری سیستم تحت شبکه. در سیستم‌های تک ورودی که تحت تأثیر محوشدگی کانال قرار دارند، حداقل ظرفیت اطلاعات مورد نیاز به‌منظور دستیابی به بازخورد میانگین مربعات پایدار، بر اساس اندازه‌گیری مالر[3] محاسبه می‌شود. در [53] منابع لازم برای دستیابی به پایداری میانگین مربعات با کانال‌های تصادفی در سیستم‌های زمان-گسسته چند ورودی-چند خروجی ارائه شده است.

۴- کاربردهای سیستم‌های کنترل شبکه‌ای

در ادامه، کاربردهای عملی NCS که در برخی از زمینه‌های مهم به‌کار گرفته شده به اختصار تشریح شده‌اند.

۴-۱- متحرک‌های متصل خودران (*CAVs*)

ربات‌ها و خودروها و اتصال آنها به یکدیگر برای دنبال کردن هدفی خاص، به‌سادگی به عنوان یک سیستم کنترل شبکه شده قابل بررسی هستند. قابلیت اتصال اشیاء به خودرو ($V2X$)[4]، این امکان را فراهم می‌کند تا تصادفات خودروها به میزان قابل توجهی کاهش یابد [54]. $V2X$، نقش اصلی را در ایجاد سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند و در متحرک‌های متصل خودران دارد. در این سیستم، توانایی عکس‌العمل بر اساس پویایی اجزای سیستم انجام می‌گیرد. هر وسیله باید تغییرات مکرر محیط را تشخیص داده و آنها را به شبکه ارسال کند. در اکثر کاربردها، به طراحی انواع متفاوت کنترل‌کننده‌ها و بررسی پاسخ‌های آنها برای تضمین کارایی مورد نظر پرداخته می‌شود. اینجا همان نقطه‌ای است که نیاز به یادگیری ماشین(ML)[5] مطرح می‌شود. در یادگیری ماشین لازم است که چارچوب یادگیری نسبت به محیط انعطاف‌پذیر/تطبیق‌پذیر باشد. سیستم خودروی خودران، طراحی شده توسط شرکت تویوتا به نام پریوس در شکل (۸) نشان داده شده است [55].



شکل ۸: شماتیک سیستم خودروی خودران

این سیستم، از قابلیت‌هایی مثل کنترل خودکار فرمان، شتاب‌گیری و ترمز را دارا می‌باشد. یک رابط بین اجزای جانبی (*PCI*) و ابزار دقیق (*PXI*) بر روی سقف خودرو قرار داده می‌شود. رابط مذکور، *eHorizon* [56] نام دارد که قادر است وسیله نقلیه را با کمک *GPS*، در داخل یک نقشه دقیق ردیابی کند. برای برنامه‌های پیچیده‌تر، مانند برنامه‌ریزی و انتخاب مسیرهای مناسب، سیستم قادر است وسیله نقلیه را با استفاده از تصاویر

[1] Piecewise affine
[2] Markov chain theory
[3] Mahler measure of plant
[4] Vehicle-to Everything
[5] Machine learning

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

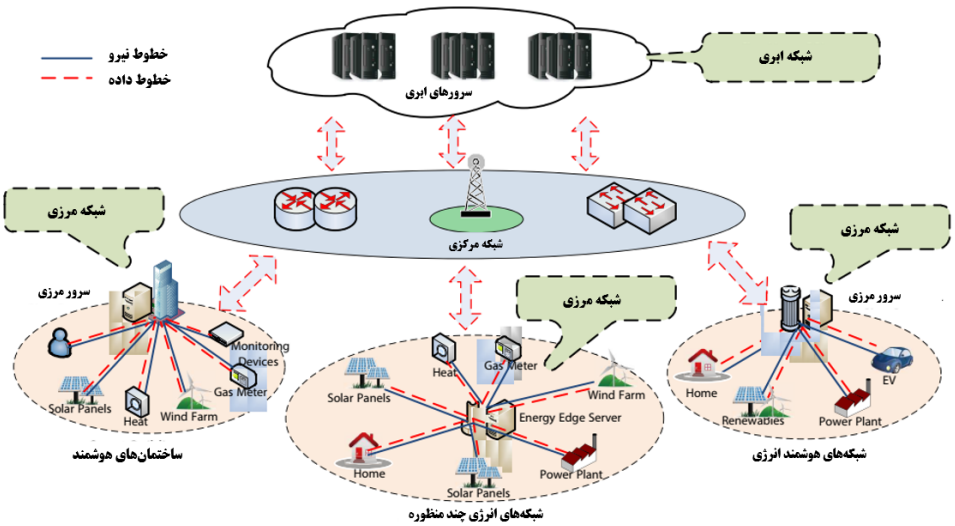
دوربین و با اطلاعات موقعیتی دریافت شده از *GPS* کنترل کند. همچنین، به کمک رادارها و دوربین‌های تعبیه شده، می‌توان برای تشخیص اشیاء استفاده کرده و از برخورد با آنها جلوگیری شود. نمونه‌های مشابه دیگر نیز برای کنترل زیردریایی و ربات‌ها ارائه شده‌اند [57].

۴-۲- شبکه‌های هوشمند انرژی

به تدریج، با انتقال اطلاعات قابل اعتماد به مناطق دوردست از طریق شبکه‌های ارتباطی، شبکه‌های هوشمند الکتریکی توسعه داده شدند [58]. شبکه‌های برق، یکی از بزرگترین سیستم‌هایی هست که توسط بشر ساخته شده است. در این سیستم‌ها، برای داشتن کارایی لازم و پایداری در حالت گذرا، تاسیسات برقی - به دلیل داشتن ماهیت بسیار تعاملی قطعات داخلی آن - باید به‌صورت کامل مورد مطالعه قرار گیرند. رشد یک شبکه الکتریکی، به مرور زمان آن را از ساختار اولیه‌اش دور می‌کند. این توسعه شبکه عملکرد آن را تحت تأثیر قرار داده و پایداری و قابلیت اطمینان شبکه را کاهش می‌دهد. با توجه به این موارد، مدیریت شبکه‌ای کوچکتر و قابل ادغام با شبکه سراسری که تحت عنوان ریزشبکه (MG)[1] شناخته می‌شود، می‌تواند راه حلی مناسب باشد [59]. MGهای نزدیک به‌هم می‌توانند برای بهره‌برداری بیشتر از مزایای منابع تولید پراکنده، به یکدیگر متصل شده، و MGهای شبکه‌شده (NMG)[2] را تشکیل دهند [60]. نمونه‌های متعددی از ریزشبکه‌های شبکه شده در [60] معرفی شده است. عموماً، تمامی طرح‌های کنترلی در ریزشبکه‌ها با کنترل سلسله مراتبی[3] انجام می‌گیرد، که شامل سه لایه کنترلی است. هر لایه کنترل پهنای باند مشخصی داشته و وظایف خاصی را انجام می‌دهد. لایه اول، سریع‌ترین پاسخ را به خطاهای فرآیند دارد. وظایف این لایه کنترل ولتاژ/ فرکانس، جریان، توزیع توان و تنظیم دینامیک‌های محلی می‌باشد. اخیراً تحقیقات در این این لایه پرنگ‌تر شده و از انواع کنترل‌کننده‌های مقاوم استفاده می‌شود. در [61]، نمونه‌ای از یک NMG ارائه شده که واحدهای تولید پراکنده از طریق انواع شبکه‌های ارتباطی *CAN* و *ZigBee* به انتقال داده‌های مرجع می‌پردازند. در [62]، یک مدل ریاضی از NMG جزیره‌ای معرفی شده است. برای جبران اثر تأخیر زمانی، سه روش کنترلی پایدارکننده، مقاوم و پیش‌بین-مقاوم استفاده شده است. پایداری کنترل‌کننده بر اساس قضیه لیاپانف تضمین گشته، و برای رد اغتشاشات خارجی، نرم $\mathcal{L}_2$ سیستم کاهش داده شده است. در هر دو مراجع [61] و [62]، برای به‌دست آوردن بهره‌های کنترل‌کننده، محدودیت‌های LMI محاسبه شده‌اند.

۴-۳- ساختمان‌ها و شهرهای هوشمند

برای مقابله با افزایش ناگهانی جمعیت، پروژه‌های شهر هوشمند توسط بسیاری از کشورها و سازمان‌ها ترویج داده شده و توسعه الگوی‌های جدید برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در شهرها توصیه شده‌اند [63]. انتظار می‌رود در آینده نزدیک، تمامی ساختمان‌ها هوشمند شده و داده‌های تولید شده در آنها به خوبی مورد پردازش و استفاده قرار گیرد. مفهوم ساختمان‌های هوشمند توسط EPBD[4] با هدف ارتقای انعطاف‌پذیری تولید انرژی تجدیدپذیر و تعامل با کاربر معرفی شد [64]. ساختمان‌های هوشمند ساختاری شبیه به ریزشبکه‌ها دارند، و متشکل از منابع تولید تجدیدپذیر و بارهای محلی هستند. حسگرها به همراه شبکه‌های ارتباطی نقش مهمی در چنین فرآیندهایی دارند، زیرا اطلاعات مربوطه را از شهروندان جمع‌آوری و به سرورها انتقال می‌دهند. حسگرها در شش زمینه مختلف کاربرد دارند: انرژی، سلامت، بهره‌وری، امنیت، مدیریت آب و پسماند. بر این اساس، بررسی و تلاش برای داشتن کارایی بهینه در هر یک از زمینه‌های ذکر شده سبب ایجاد شهرهای هوشمند می‌شود. علاوه بر این، مسئله کربن زدایی جهانی و الکتریکی شدن نیازهای بشر، منجر به پیدایش فناوری‌های جدید مانند وسایل نقلیه الکتریکی (EV) شده است [65]. نمونه‌ای از شهرهای هوشمند در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل ۹: معماری شهرهای هوشمند

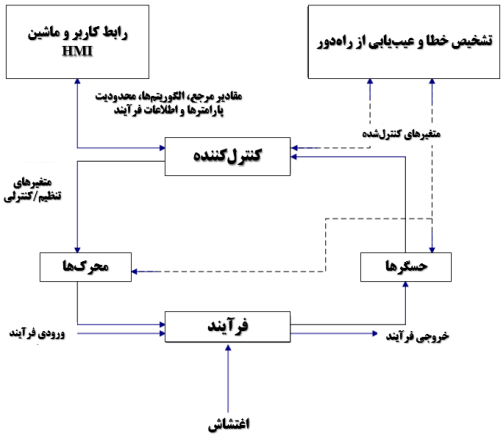
[1] Microgrid
[2] Networked microgrid
[3] Hierarchical control design/ structure
[4] Energy Performance Building Directive

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

سیستم‌های کنترل شبکه‌ای نقش مهمی در کنترل و مدیریت تجهیزات در ساختمان‌ها و شهرهای هوشمند دارند به‌طوری که می‌توانند ویژگی‌هایی مانند کاهش مصرف انرژی، افزایش رفاه، کیفیت و امنیت ساکنان را به ارمغان آورند. با این حال، برخی چالش‌های مرتبط مانند مسئله امنیت حریم شخصی و احتمال وقوع حملات سایبری در شبکه و سایر تجهیزات مطرح می‌گردد که نیازمند بررسی و توسعه هستند.

۴-۴- فرآیندهای تولیدی

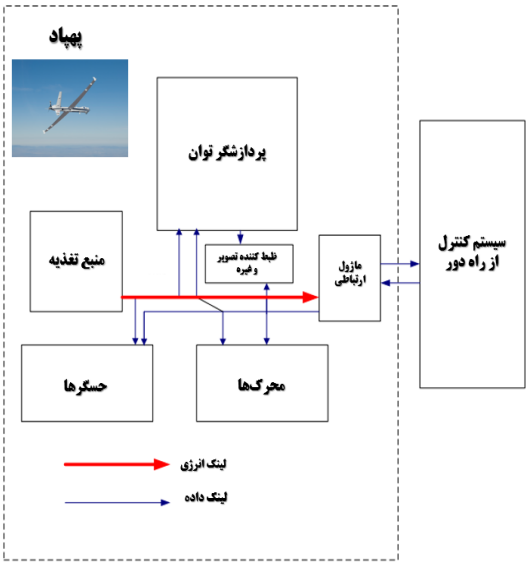
جهت رشد فرآیندهای اقتصادی با هدف افزایش قیمت و کاهش حجم دور ریز مواد اولیه، طراحی سیستم‌های تولیدی از مدل متمرکز مرسوم به مدل توزیع شده و سپس به سمت سیستم‌های شبکه‌ای مدرن پیش می‌رود. در شرایط کنونی، فرآیندهای تولیدی به کمک سیستم‌های ارتباطی شبکه‌ای، مجموعه‌ای متنوع از دستگاه‌های تولیدی را در یک چارچوب و مدل شبکه‌ای کنترل می‌کنند [66]. سیستم کنترل یک فرآیند تولیدی صنعتی در شکل (۱۰) نشان داده شده است [67]. این سیستم شامل تعداد زیادی حلقه کنترل، رابط انسان و ماشین (*HMIs*)، تشخیص از راه دور، حسگرها و محرک‌ها می‌باشد و بر اساس معماری شبکه لایه‌ای[1] طراحی شده است. قسمت اصلی سیستم دارای یک حلقه کنترل شامل حسگرها، محرک‌ها و کنترل‌کننده‌ها می‌باشد که برای انجام پردازش‌های کنترل‌شده (از پیش تعیین شده) خاصی منظور شده است. شناسایی فرکانس رادیویی (*RFID*) یکی از رویکردهایی می‌باشد که به‌طور گسترده در برنامه‌های ردیابی اشیاء استفاده می‌شود، اما یکی از معایب آن، نیاز به وجود منبع تغذیه می‌باشد.



شکل ۱۰. سیستم کنترل یک فرآیند تولیدی صنعتی

۴-۵- پهپاد (وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین)

امروزه پهپادها (*UAVs*)[2] در بسیاری از کاربردها محبوبیت پیدا کرده‌اند. اگرچه چنین طرح‌هایی عمدتاً در برنامه‌های نظامی بیشتر مورد توجه قرار گرفته، اما در مواقعی می‌توان از آن برای شناسایی مناطق مختلف غیرقابل دسترس استفاده کرد [68]. به عنوان مثال، در حوزه کشاورزی، از آنها برای مشاهدات میدانی یا برای سمپاشی استفاده می‌شود. از پهپادها به‌منظور گشت‌زنی در جنگل‌ها، برای رصد ترافیک در سطح شهرها و در عکاسی خودکار از مناظر نیز استفاده می‌شود. در سایر زمینه‌های تجزیه و تحلیل و آموزشی مانند آزمایشگاه‌های پرواز و ارزیابی الگوریتم‌های کنترل، به عنوان ابزار آموزشی به فراگیران معرفی می‌شود [69]. در شکل (۱۱)، نمای داخلی یک پهپاد خودران نمایش داده شده است. این فرآیند، از بخش‌های کنترلی مختلف، سنسورها، محرک‌ها (شیرها و موتورها)، واحدهای ارتباطی و غیره تشکیل شده است و به عنوان پلی بین پهپاد و سیستم کنترل از راه دور عمل می‌کند. سیستم کنترل از راه دور می‌تواند به اطلاعات دسترسی پیدا کرده و همچنین دستوراتی جدید به پهپاد ارسال کند.



شکل ۱۱. بخش‌های مختلف وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین خودران (*UAV*)

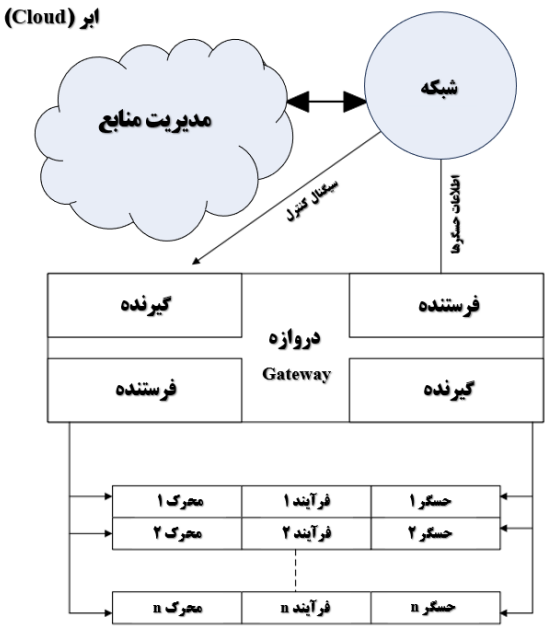
۴-۶- رایانش ابری

سیستم‌های کنترل ابری و شبکه‌ای، از مزیّت‌های محاسبات ابری و نظریه پیشرفته سیستم‌های کنترل شبکه‌ای و سایر رویکردهای بی‌سیم برای ارتباطات بهره می‌برند. شکل (۱۲)، NCS مبتنی بر رایانش ابری را نشان می‌دهد. این سیستم شامل، پردازشگرهای مناسب، ابر محاسباتی، شبکه و فرآیندهایی است که باید کنترل شوند. ابر به مقدار کافی از منابع محاسباتی، توان و ذخیره‌سازی مجهز شده است. داده‌های حسگرها از طریق شبکه به ابر برای ارزیابی و تولید سیگنال‌های کنترلی ارسال می‌شود. در صورت نیاز، سیگنال‌های کنترلی به‌روز شده و فرامین کنترلی به فرآیندها ارسال می‌شوند. در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای با مقیاس بزرگ، اطلاعات، حاوی داده‌های جمع‌آوری شده از تجهیزات قابل حمل، سیستم‌های سنجش از راه دور، دوربین‌ها، میکروفون‌ها، *RFID*ها و *WSN*ها می‌باشد [70].

[1] Layered network architecture

[2] Unmanned aerial vehicles

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]



شکل ۱۲. NCS مبتنی بر رایانش ابری

۵- سمت‌گیری‌های پژوهش در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای

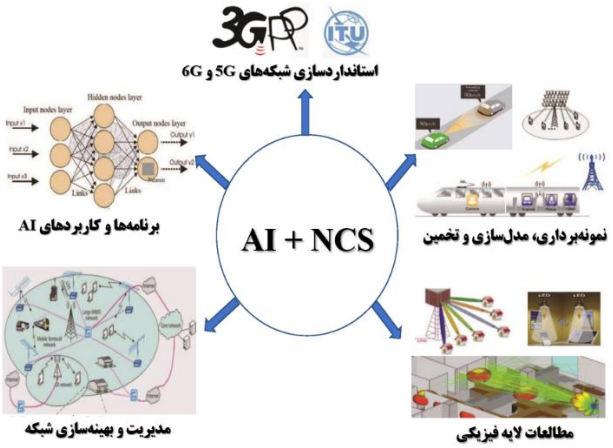
با توجه به موارد ذکر شده، زمینه‌هایی که می‌توانند در جهت‌گیری NCS نقش مهمی ایفا کنند در ادامه تشریح می‌شوند.

۵-۱- بهینه‌سازی توپولوژی شبکه

توسعه استراتژی‌ها و الگوریتم‌های جدید کنترل در NCS باید با در نظر گرفتن چالش‌های مطرح شده در این مقاله انجام گیرد. بررسی پتانسیل شبکه‌های بی‌سیم، مانند بلوتوث، *ZigBee* و *Z-Wave*، در برنامه‌های کنترل شبکه‌ای که مصرف انرژی کم و مقیاس‌پذیری خوبی دارند توصیه می‌شود اما این زمینه‌ها نیز باید به سمت بهتر شدن سوق پیدا کند. با در نظر گرفتن همزمان «کنترل شبکه‌ها» و «کنترل از بستر شبکه‌ها»، انتظار می‌رود طرح‌های بهینه در NCS توسعه داده شوند. چنین طرح‌هایی که تحت عنوان "*Co-design*" معرفی می‌شوند، هم از پروتکل‌های ارتباطی مناسب برای اطمینان از کیفیت سرویس شبکه‌ای (QoS) خوب و هم از استراتژی‌های مناسب کنترلی که در NCS به‌طور چشم‌گیر کارایی سیستم را بالا می‌برد تا وظایف پیچیده‌تر را انجام دهد، استفاده می‌کنند [71]. یکی از گام‌های ضروری برای تطبیق رویکردهای نظری سیستم و نظریه گراف، یافتن تفاسیر جبری از ساختارهای شبکه‌ای خاص است. نظریه گراف یک موضوع فعال در ریاضیات است [13]. با این حال، داشتن ویژگی‌های ساختاری خاص در شبکه‌ها و مقاوم بودن آن‌ها، که به‌طور گسترده در تحلیل انعطاف‌پذیری NCSها استفاده می‌شوند، مفاهیمی کاملاً جدید هستند که در حوزه سیستم و کنترل تعریف شده‌اند. از این رو، چنین تفاسیری به خوبی در NCS مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند و لذا قابلیت بررسی بیشتری دارند [72].

۵-۲- تکنولوژی یادگیری ماشین و یادگیری عمیق

استفاده از هوش مصنوعی (AI) و روش‌های یادگیری ماشین (ML) در NCSها، یادگیری تقویتی (RL)[1]، یادگیری عمیق (DL) و یادگیری فدرال (FL)[2] را در پی دارد. این کار باعث افزایش هوش کنترل‌کننده‌ها، افزایش سازگاری و استحکام سیستم خواهد شد. فناوری‌های AI و به‌ویژه ML این پتانسیل را دارند که با استفاده از مقادیر زیادی داده که در شبکه‌های نسل پنجم تلفن همراه و فراتر از نسل پنج وجود دارد، مشکلات به‌ظاهر حل‌ناپذیر را به‌طور کارآمد هموار کنند. روش‌های یادگیری ماشین قادرند به‌طور خودکار اطلاعات کانال‌های ناشناخته را با یادگیری از سایر داده‌های ارتباطی و دانش قبلی شناسایی کنند. الگوریتم‌های پیچیده‌تر ML (DL و FL) توانایی مدل‌سازی همبستگی فرآیندهای غیرخطی[3] و تخمین پارامترهای بهینه سیستم را دارند. ML، پیکربندی شبکه‌ها را با یافتن الگوهای رفتاری که پاسخ‌های سریع و انعطاف‌پذیر به سناریوهای مختلف دارد، تطبیق می‌دهد، به‌عنوان مثال، پیش‌بینی ترافیک و برنامه‌ریزی مسیر و یا واکنش به رویدادهای غیرمنتظره. در شکل (۱۳)، زمینه‌هایی که فناوری‌های AI را وارد NCSها می‌کند نشان شده است.



شکل ۱۳: زمینه‌های کاربردی و پژوهشی در AI و NCS

[1] Reinforcement learning
[2] Federated learning
[3] Nonlinear correlation

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

۵-۳- نظریه کوانتومی و مکانیسم بهینه‌سازی موازی

الگوریتم‌های فراابتکاری الهام‌گرفته شده از کوانتوم، برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی در علوم و مهندسی، مانند بهینه‌سازی توابع، دسته‌بندی تصویر، خوشه‌بندی[1]، زمان‌بندی، مسیریابی و ML به‌کار گرفته می‌شوند. آنها از نظر انعطاف‌پذیری، استحکام، دقت و همگرایی نسبت به روش‌های کلاسیک مزایایی فراوانی دارند. محاسبات کوانتومی زمینه جدیدی از تحقیقات است که از قوانین مکانیک کوانتوم برای ذخیره و پردازش اطلاعات استفاده می‌کند. از دیدگاهی دیگر، چنین راه‌حل‌هایی، روش‌های بهینه‌سازی هستند که مفاهیم محاسبات کوانتومی را با اکتشاف‌های الهام گرفته شده از طبیعت ادغام می‌کنند که الگوریتم‌های تکاملی[2]، بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها[3]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات[4] و الگوریتم خفاش[5] نمونه‌هایی از آن می‌باشد [73]. هدف فرآیند مجهز به تکنولوژی کوانتومی، دستیابی به عملکرد و سرعت بالاتر نسبت به نمونه‌های معمولی با بهره‌برداری از مکانیسم‌های بهینه‌سازی موازی یا به اصطلاح موازی‌سازی کوانتومی[6]، برهم نهی و درهم تنیدگی کوانتومی می‌باشد. واحد اصلی اطلاعات کوانتومی یک کیوبیت است که می‌تواند در یک برهم نهی دو حالت صفر و یک به‌طور همزمان داشته باشد. شبکه‌های کوانتومی می‌توانند محاسبات موازی را در مقیاس‌های بزرگ، با به‌روزرسانی کیوبیت‌ها در دروازه‌های کوانتومی سرورها و گرفتن مجدد بازخورد از آن‌ها، انجام دهند.

۵-۴- تکنولوژی اینترنت اشیاء

هنگامی که دستگاه‌های خانگی به اینترنت متصل می‌شوند، مفهوم اینترنت اشیا (IoT) شکل می‌گیرد. به‌کارگیری فناوری‌های IoT در شهرها و ساختمان‌ها نه تنها می‌تواند خدمات هوشمندانه‌ای را به کاربران ارائه کند، بلکه از نظر مدیریت منابع نیز مزیّت دارد. چالش‌های متعددی در هنگام توسعه برنامه‌های کاربردی برای این دو حوزه وجود دارند. قابلیت مدیریت، قابلیت اتصال و قابلیت برنامه‌ریزی سه مورد از چالش‌های اصلی در این زمینه‌ها هستند [74]. برای کاهش پیچیدگی در اتصالات، سه نوع تبادل داده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نوع مبتنی بر ابر، مبتنی بر NDN[7] و نوع تبادل داده همتا به همتا[8]. یکی از جهت‌گیری‌های احتمالی آینده IoT در NCS، ترکیب محاسبات مرزی[9]، شبکه‌های نرم‌افزاری و فناوری‌های نسل پنجم برای ارائه مدیریت متمرکز، عملکرد بالا و تأخیر کم در برنامه‌های مختلف می‌باشد. محاسبات مرزی می‌تواند تجزیه و تحلیل داده‌ها را در نزدیکی منابع تولید اطلاعات انجام، و سبب کاهش بار شبکه و بهبود زمان پاسخ‌گویی شود. با ترکیب این سه فناوری، IoT می‌تواند به مقیاس‌پذیری، کارایی و قابلیت اطمینان بهتر در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای کمک کند [75,76].

۵-۵- شبکه‌های نسل‌های پنجم و ششم

انتظار می‌رود که شبکه‌های نسل‌های پنجم و ششم، در آینده توسعه یافته و نرخ بالاتری از داده‌ها را پوشش دهند. این شبکه‌ها باعث بهبود کارایی در استفاده از منابع شده و امنیت، سازگاری و مقیاس‌پذیری سیستم‌ها را افزایش می‌دهند [77]. شبکه‌های ۵G از ترکیبی از فرکانس‌های زیر ۶ گیگاهرتز و امواج میلی‌متری (mmWave) برای دستیابی به نرخ بالای اطلاعات، تأخیر ناچیز و اتصالات گسترده استفاده می‌کنند. شبکه‌های ۵G همچنین از برش شبکه[10] پشتیبانی می‌کنند که به انواع مختلف سرویس‌ها اجازه می‌دهد که تجهیزات، عملکردی سفارشی‌شده داشته باشند. انتظار می‌رود شبکه‌های ۶G از فرکانس‌های بالاتری مانند تراهرتز (THz) که توسط باندل‌های نوری محقق می‌شود به نرخ‌های داده فوق‌العاده بالا و بدون تأخیر (در حد صفر) دست یابند. شبکه‌های ۶G همچنین از روش‌های AI و ML برای مدیریت هوشمند و تطبیقی شبکه و ارائه سرویس، استفاده خواهند کرد. لذا برخی از جهت‌گیری‌های مربوط به شبکه‌های نسل‌های پنجم و ششم در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای عبارتند از:

- بهره‌برداری از THz، ارتباطات نور مرئی[11] و شبکه‌های غیرزمینی[12] برای گسترش طیف و پوشش شبکه‌های بی‌سیم [78]
- استفاده از AI، ML و بلاک‌چین[13] برای افزایش امنیت، حریم خصوصی و قابلیت اطمینان شبکه و فعال کردن عملکردهای شناختی و تطبیقی شبکه [79].

۵-۶- محاسبات مرزی

محاسبات مرزی روشی برای پردازش داده‌ها به جای ارسال آن به یک سرور مرکزی ابریست. این رویکرد می‌تواند سرعت، قابلیت اطمینان و امنیت NCSها را بهبود بخشد. محاسبات مرزی به NCS کمک می‌کند تا پردازش داده‌ها به‌صورت محلی، در مرز شبکه انجام گیرد و فقط اطلاعات مفید را به ابر یا سایر دستگاه‌های مرزی ارسال کند. این کار می‌تواند ازدحام شبکه، مصرف پهنای باند و هزینه‌های انرژی را کاهش دهد و همچنین باعث حفظ حریم خصوصی و افزایش انعطاف‌پذیری داده‌ها شود. برخی از جهت‌گیری‌های آینده در محاسبات مرزی در NCSها عبارتند از [80]:

- توسعه معماری‌ها و پروتکل‌های استاندارد برای محاسبات مرزی باعث ایجاد هم‌کاری، مقیاس‌پذیری و امنیت در

[1] Clustering
[2] Evolutionary algorithms
[3] Ant colony optimization
[4] Particle swarm optimization
[5] Bat algorithm
[6] Quantum parallelism/ Parallel optimization mechanisms
[7] Named-data network
[8] Peer-to-Peer message exchange
[9] Edge computing
[10] Network slicing
[11] Visible light communication
[12] Non-terrestrial networks
[13] Blockchain

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

دستگاه‌ها می‌شود و امکان پشتیبانی در پلتفرم‌های مختلف مهیا می‌گردد.

- روش‌های AI و ML برای هوشمندسازی دستگاه‌های مرزی با یادگیری از داده‌ها و انطباق با محیط‌های متغیر و ترجیحات کاربر استفاده خواهد شد.
- محاسبات مرزی با شبکه‌های 5G و دستگاه‌های IoT به‌منظور کاهش تأخیر، ایجاد پهنای باند بالا و اتصالات گسترده‌تر در NCS ادغام خواهند شد.
- برنامه‌های کاربردی جدید و استفاده از محاسبات مرزی در شبکه‌های شهرهای هوشمند، وسایل نقلیه خودران، مراقبت‌های پزشکی و کشاورزی بررسی و به‌کار گرفته خواهند شد.

۵-۷- امنیت و شناسایی حملات سایبری

امنیت سیستم‌های کنترل شبکه‌ای یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که اخیراً بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد [83–81]. هر شبکه‌ای به‌ویژه شبکه‌های بی‌سیم مستعد حملات سایبری هستند. سیستم‌های امنیتی برای شناسایی حملات سایبری و اطمینان از کارایی و ایمنی بهینه فرآیند، نیاز به پردازش داده‌های بلادرنگ دارند. برخی از جهت‌گیری‌های آتی در مورد امنیت شبکه و تشخیص حملات سایبری در NCSها عبارتند از:

- توسعه روش‌ها و الگوریتم‌های جدید برای شناسایی و کاهش حملات سایبری پیچیده و مخفی مانند حملات روز صفر[1]، تهدیدات پیشرفته پایدار و حملات هماهنگ‌شده [84].
- استفاده از روش‌های AI و ML برای ایجاد امنیت در شبکه و شناسایی حملات سایبری مقاوم و فعال، با یادگیری از داده‌ها و بازخوردها [85].
- بررسی برنامه‌ها و چالش‌های جدید امنیت شبکه‌ای و تشخیص حملات سایبری در NCSهای نوظهور، مانند شبکه‌های هوشمند، حمل‌ونقل هوشمند، مراقبت‌های پزشکی و بهداشتی هوشمند و کشاورزی هوشمند.

۶- جمع‌بندی

سیستم‌های کنترل شبکه‌ای یکی از زمینه‌هایی است که نیاز مبرم به استفاده از منابع محاسباتی و فناوری‌های ارتباطی دارد و توسعه هر کدام، در تسریع روند توسعه NCS تأثیر می‌گذارد. با این‌حال، توسعه برخی روش‌ها و الگوریتم‌های جدید ممکن است ملاحظات اقتصادی را زیر پا گذاشته و عملاً امکان‌پذیر نبوده، اما قابلیت مصالحه داشته باشند. علاوه بر این، توسعه روش‌های جدید سبب پدیدار شدن چالش‌های جدیدی نیز می‌شود که می‌بایست در نظر گرفته شوند (مانند مشکل بیش‌برازش[2] در هوش مصنوعی). زین پس، هرگونه پیشرفت در جهت هوشمندسازی کاربردهای نوظهور، زیر سایه NCS خواهد بود.

یکی از خواسته‌های کمال طلبانه بشر، داشتن زندگی فرا سیّاره‌ایست. پس از گذشت قریب به نیم قرن از صعود اولین انسان بر روی کره ماه (۱۹۶۹)، چنین پروژه‌هایی محبوبیت دوباره پیدا کرده و پروژه‌های جدید سفر انسان به مریخ را تدارک دیده‌اند. امکان عملی شدن چنین خواسته‌هایی مستلزم نبوغ، گسترش تکنولوژی، توسعه سیستم‌های کنترل و زیرساخت‌های شبکه‌ایست. هر ساله دانشمندان، مهندسان و توسعه‌دهندگان ناسا (NASA) بسته‌های نرم‌افزاری برای مدیریت مأموریت‌های فضایی، آزمایش فضاپیماها و تجزیه و تحلیل داده‌های تولید شده توسط ماهواره‌ها را در قالب گزارشی به محققین حوزه‌های مختلف ارائه می‌دهند [86]. در یک گزارش که به تازگی منتشر شده، سیستم‌های رادیویی مخابرات فضایی (STRS)[3] [87]، بررسی شده است که اهمیّت مفاهیم سیستم‌های کنترل شبکه‌ای و کاربردهای آن را انعکاس می‌دهد. نمونه‌های مرتبط دیگری مانند، ایجاد پایگاه‌های داده‌ای فضایی [88] و ارتباطات بین سیّاره‌ای [89] نیز ارائه شده‌اند که به اهمیّت وجود نظریه‌های ذکر شده در این مقاله اشاره دارند. با توجه به واقعیت غیرقابل انکار NCSهای پیچیده که دارای ویژگی‌های منطقه وسیع و داده‌های بزرگ[4] هستند، فناوری‌های کنترل شبکه‌ای باید با فناوری‌های رایانه و داده‌کاوی هوشمند ادغام شوند. لذا در این مقاله روش‌ها و الگوریتم‌های کنترلی مؤثر در NCS معرفی و به سمت‌گیری‌های پژوهش در این زمینه اشاره شد.

مراجع

[1] A. Wicaksana, T. Rachman, Networked Control Systems, 2018.
[2] J. Baillieul, P.J. Antsaklis, Control and communication challenges in networked real-time systems, Proceedings of the IEEE. 95 (2007) 9–28.
[3] M.K. Gautam, A. Pati, S.K. Mishra, B. Appasani, E. Kabalci, N. Bizon, P. Thounthong, A comprehensive review of the evolution of networked control system technology and its future potentials, Sustainability (Switzerland). 13 (2021) 1–39. https://doi.org/10.3390/su13052962.
[4] D. Zhang, P. Shi, Q.-G. Wang, L. Yu, Analysis and synthesis of networked control systems: A survey of recent advances and challenges, ISA Transactions. 66 (2017) 376–392.
[5] M. Li, Y. Chen, Challenging research for networked control systems : A survey, (2019). https://doi.org/10.1177/0142331218799818.
[6] W. Zhou, Y. Wang, Y. Liang, Sliding mode control for networked control systems: A brief survey, ISA Transactions. 124 (2022) 249–259. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.12.049.
[7] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, A survey on sensor networks, IEEE Communications Magazine. 40 (2002) 102–114.
[8] X. Ge, F. Yang, Q.L. Han, Distributed networked

[1] Zero-day attacks
[2] Overfitting
[3] Space Telecommunications Radio Systems
[4] Big data

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

Journal of Robust and Nonlinear Control. 32 (2022) 5184–5199.
[26] H. Yang, S. Wang, P. Li, H∞ negative imaginary static output feedback controller for low frequency networked control systems, International Journal of Control. (2023) 1–9.
[27] A. Baños, J. Salt, V. Casanova, A QFT approach to robust dual-rate control systems, International Journal of Robust and Nonlinear Control. 32 (2022) 1026–1054.
[28] J. Sun, M. Cantoni, On Riccati contraction in time-varying linear-quadratic control, ArXiv Preprint ArXiv:2305.06003. (2023).
[29] N. Sivashankar, P.P. Khargonekar, Characterization of the L_2-induced norm for linear systems with jumps with applications to sampled-data systems, SIAM Journal on Control and Optimization. 32 (1994) 1128–1150.
[30] X.-M. Zhang, Q.-L. Han, X. Ge, B. Ning, B.-L. Zhang, Sampled-data control systems with non-uniform sampling: A survey of methods and trends, Annual Reviews in Control. (2023).
[31] T. Başar, P. Bernhard, H∞-optimal control and related minimax design problems, (No Title). (2008).
[32] M. Wang, P. Li, X. Li, Event-triggered delayed impulsive control for input-to-state stability of nonlinear impulsive systems, Nonlinear Analysis: Hybrid Systems. 47 (2023) 101277.
[33] F. Shi, Y. Liu, Y. Li, J. Qiu, Input-to-state stability of nonlinear systems with hybrid inputs and delayed impulses, Nonlinear Analysis: Hybrid Systems. 44 (2022) 101145.
[34] Y. V Mikheev, V.A. Sobolev, E.M. Fridman, Asymptotic analysis of digital control systems, Automation and Remote Control. 49 (1988) 1175–1180.
[35] K.J. Åström, B. Wittenmark, Adaptive control, Courier Corporation, 2013.
[36] E.M. Fridman, Use of models with aftereffect in the problem of the design of optimal digital-control systems, Automation and Remote Control. 53 (1992) 1523–1528.
[37] Y. He, Q.-G. Wang, C. Lin, M. Wu, Delay-range-dependent stability for systems with time-varying delay, Automatica. 43 (2007) 371–376.
[38] P. Park, J.W. Ko, C. Jeong, Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays, Automatica. 47 (2011) 235–238.
[39] K. Liu, E. Fridman, Wirtinger's inequality and Lyapunov-based sampled-data stabilization, Automatica. 48 (2012) 102–108.
[40] W. Ma, X.-C. Jia, F. Yang, X. Chi, Fuzzy dynamic output feedback control for nonlinear networked multirate sampled-data systems: An integral inequality method, Fuzzy Sets and Systems. 452 (2023) 110–130.
[41] R. Subramaniyam, Y.H. Joo, H∞ Control design for discrete-time nonlinear delayed systems, International Journal of Robust and Nonlinear Control. 33 (2023) 6188–6210.
[42] Y. Wang, C. Hua, Y. Qiu, Robust stability and H∞ control for networked control systems with control systems: A brief overview, Information Sciences. 380 (2017) 117–131. https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.07.047.
[9] R.E. Kalman, Nonlinear analysis of sampled-data control systems, in: Proc. Symp. Nonlinear Circuit Analysis, 1956, 1956: pp. 273–312.
[10] D.F. Delchamps, Stabilizing a linear system with quantized state feedback, IEEE Transactions on Automatic Control. 35 (1990) 916–924.
[11] K. You, L. Xie, Survey of Recent Progress in Networked Control Systems, Acta Automatica Sinica. 39 (n.d.) 101–117. https://doi.org/10.1016/S1874-1029(13)60013-0.
[12] S.H. Strogatz, Exploring complex networks, Nature. 410 (2001) 268–276.
[13] C. Godsil, G.F. Royle, Algebraic graph theory, Springer Science & Business Media, 2001.
[14] N.C. Systems, Control over communication networks, in: Communications and Control Engineering, 2005: pp. 361–385. https://doi.org/10.1007/1-84628-063-X_16.
[15] M. Mesbahi, M. Egerstedt, Graph theoretic methods in multiagent networks, Princeton University Press, 2010.
[16] Y. Hatano, M. Mesbahi, Agreement Over Random Networks, 50 (2005) 1867–1872.
[17] S.P. Paul, S. Aggarwal, A Systematic Analysis of Research Trends on Network Control System in Wireless Sensor Network, in: 2022 8th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), IEEE, 2022: pp. 1758–1763.
[18] R.M. D'Souza, M. di Bernardo, Y.-Y. Liu, Controlling complex networks with complex nodes, Nature Reviews Physics. 5 (2023) 250–262.
[19] K. Cai, M. Nagahara, A new perspective on cooperative control of multi-agent systems through different types of graph Laplacians, Advanced Robotics. 37 (2023) 2–11.
[20] X.M. Zhang, Q.L. Han, X. Ge, D. Ding, L. Ding, D. Yue, C. Peng, Networked control systems: A survey of trends and techniques, IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 7 (2020) 1–17. https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911651.
[21] J. Xu, J. Huang, An Overview of Recent Advances in the Event-Triggered Consensus of Multi-Agent Systems with Actuator Saturations, Mathematics. 10 (2022) 3879.
[22] K. Zhang, Event-Triggered Stabilization of Linear Time-Delay Systems via Halanay-Type Inequality, IEEE Control Systems Letters. (2023).
[23] M. Ghodrat, H.J. Marquez, A new Lyapunov-based event-triggered control of linear systems, IEEE Transactions on Automatic Control. 68 (2022) 2599–2606.
[24] B. Sadeghi Sabzevari, M. Haddad Zarif, S.K. Hosseini Sani, Event-triggered Predictive Networked Control Systems with Network Imperfections and External Disturbance, مجله الکترونیک صنعتی ،کنترل و بهینه سازی. undefined (1401).
[25] H. Yang, S. Wang, P. Li, Digital H∞ filter design for a low frequency multiple-input multiple-output system with multirate measurements, International

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

_en/03_dynamic_ehorizon_en.%0Ahtml.

[57] A. Barimani, R. Salehnezhad, B. Nasiri Omali, A.A. Ghaffari, D. Domiri Ganji, Wireless Navigation and Control of Smart Robots and Submarines through Smart Network and Telecommunications, in: دومین کنفرانس بین المللی مکانیک، برق، مهندسی هوافضا و علوم مهندسی, ۱۴۰۱.

[58] Y.A. Mill, F. Vargas, F. Molano, E. Mojica, A Wireless Networked Control Systems Review, (n.d.).

[59] Y. Yoldaş, A. Önen, S.M. Muyeen, A. V. Vasilakos, İ. Alan, Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 72 (2017) 205–214. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.064.

[60] Q. Zhou, M. Shahidehpour, A. Paaso, S. Bahramirad, A. Alabdulwahab, A. Abusorrah, Distributed Control and Communication Strategies in Networked Microgrids, IEEE Communications Surveys and Tutorials. 22 (2020) 2586–2633. https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3023963.

[61] M.P. Talatape, A.A. Afzalian, A non-singular terminal sliding mode controller for a communication-based hybrid microgrid, Journal of Energy Storage. 76 (2024) 109742.

[62] Q. Shafiee, Č. Stefanović, T. Dragičević, P. Popovski, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero, Robust networked control scheme for distributed secondary control of islanded microgrids, IEEE Transactions on Industrial Electronics. 61 (2013) 5363–5374.

[63] Y. Liu, C. Yang, L. Jiang, S. Xie, Y. Zhang, INTERNET OF THINGS FOR SMART CITITES : Intelligent Edge Computing for IoT-Based Energy Management in Smart Cities, IEEE Network. 33 (2019) 111–117. https://doi.org/10.1109/MNET.2019.1800254.

[64] J. Al Dakheel, C. Del Pero, Smart Buildings Features and Key Performance Indicators: A Review, Sustainable Cities and Society. (2020) 102328. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102328.

[65] M. Roccotelli, A.M. Mangini, Advances on Smart Cities and Smart Buildings, (2022) 10–12.

[66] L.Q. Zhuang, D.H. Zhang, M.M. Wong, Wireless Sensor Networks for Networked Manufacturing Systems, in: Factory Automation, IntechOpen, 2010.

[67] J. Michaloski, A. Wavering, M.L. cAnthony Barbera, Vehicle Systems Version 2.0, (n.d.).

[68] R.W. Prouty, Helicopter performance, stability, and control, 1995.

[69] O. Spinka, S. Kroupa, Z. Hanzálek, Control system for unmanned aerial vehicles, in: 2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics, IEEE, 2007: pp. 455–460.

[70] T. Segaran, J. Hammerbacher, Beautiful data: the stories behind elegant data solutions, " O'Reilly Media, Inc.," 2009.

[71] X. Zhang, S. Member, Q. Han, X. Ge, D. Ding, Networked Control Systems : A Survey of Trends and Techniques, IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. PP (n.d.) 1–17.

transmission delay and its application to 2 DoF laboratory helicopter, Journal of the Franklin Institute. 360 (2023) 2827–2847.

[43] M.M. Azimi, A.A. Afzalian, R. Ghaderi, Robust decentralised state feedback control design for large-scale networked control system, International Journal of Systems Science. 49 (2018) 1809–1820.

[44] M.M. Azimi, A.A. Afzalian, R. Ghaderi, Robust decentralized networked control design for multi-area load frequency control, in: 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), IEEE, 2017: pp. 853–858.

[45] م. حسینی تودشکی, Adaptive Robust H∞ finite-time congestion control design for TCP/AQM Network System with parametric uncertainties, فصلنامه مهندسی برق دانشگاه تبریز. undefined (1401).

[46] X. Zhao, L. Zhang, P. Shi, M. Liu, Stability and stabilization of switched linear systems with mode-dependent average dwell time, IEEE Transactions on Automatic Control. 57 (2011) 1809–1815.

[47] L. Hou, X. Ma, H. Sun, Stabilization of switched linear systems under asynchronous switching subject to admissible edge-dependent average dwell time, Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 23 (2022) 810–822.

[48] J. Wu, R. Yang, J. Sun, Y. Zhu, Event-triggered finite-time stabilization of nonlinear switched affine systems under mode-dependent and state-dependent switchings, Control Engineering Practice. 138 (2023) 105602.

[49] H. Zhang, Y. Zhang, X. Zhao, Event-Triggered Adaptive Dynamic Programming for Hierarchical Sliding-Mode Surface-Based Optimal Control of Switched Nonlinear Systems, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. (2023).

[50] L. Zhang, E.-K. Boukas, Stability and stabilization of Markovian jump linear systems with partly unknown transition probabilities, Automatica. 45 (2009) 463–468.

[51] R. Ling, L. Yu, D. Zhang, W. Zhang, A Markovian system approach to distributed H∞ filtering for sensor networks with stochastic sampling, Journal of the Franklin Institute. 351 (2014) 4998–5014.

[52] Z. Cao, Y. Niu, Y. Zou, Self-triggered multi-mode control of Markovian jump systems, Automatica. 149 (2023) 110837.

[53] N. Xiao, L. Xie, L. Qiu, Feedback stabilization of discrete-time networked systems over fading channels, IEEE Transactions on Automatic Control. 57 (2012) 2176–2189.

[54] S. Kim, B.J. Kim, Reinforcement Learning for Accident Risk-Adaptive V2X Networking, IEEE Vehicular Technology Conference. 2020-Novem (2020). https://doi.org/10.1109/VTC2020-Fall49728.2020.9348445.

[55] A. de Winter, S. Baldi, Real-life implementation of a GPS-based path-following system for an autonomous vehicle, Sensors (Switzerland). 18 (2018). https://doi.org/10.3390/s18113940.

[56] continental-automotive, (n.d.). http://www.continental-automotive.com/www/%0Aautomotive_de_en/themes/commercial_vehicles/ch_interior_en/ehorizon

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]

[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]

control systems, IEEE Transactions on Cybernetics. 48 (2018) 3254–3264.
[85] N. Oliveira, I. Praça, E. Maia, O. Sousa, Intelligent cyber attack detection and classification for network-based intrusion detection systems, Applied Sciences. 11 (2021) 1674.
[86] NASA Software Catalog, NASA. (n.d.). https://www.nasa.gov/press-release/nasa-software-catalog-offers-free-programs-for-earth-science-more.
[87] Space Telecommunications Radio System (STRS) Reference Implementation (RI) (LEW-19083-1), NASA. (n.d.). https://software.nasa.gov/software/LEW-19083-1.
[88] PDSC: Planetary Data System Coincidences (NPO-50785-1), NASA. (n.d.). https://software.nasa.gov/software/NPO-50785-1.
[89] DTKA, a Prototype Implementation of Delay-Tolerant Security Key Distribution (NPO-49413-1), NASA. (n.d.). https://software.nasa.gov/software/NPO-49413-1.
https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911651.
[72] M. Pirani, A. Mitra, S. Sundaram, A Survey of Graph-Theoretic Approaches for Analyzing the Resilience of Networked Control Systems, (2022).
[73] F.S. Gharehchopogh, Quantum-inspired metaheuristic algorithms: comprehensive survey and classification, Artificial Intelligence Review. 56 (2023) 5479–5543.
[74] C.S. Shih, K.H. Lee, J.J. Chou, K.J. Lin, Data-driven IoT applications design for smart city and smart buildings, 2017 IEEE SmartWorld Ubiquitous Intelligence and Computing, Advanced and Trusted Computed, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation, SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCom/IOP/SCI 2017 - . (2018) 1–8. https://doi.org/10.1109/UIC-ATC.2017.8397394.
[75] K. Shafique, B.A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, M. Mustaqim, Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT Scenarios, IEEE Access. 8 (2020) 23022–23040. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970118.
[76] Borah, Kumar, Development of an Embedded Moisture Sensing Device for a Distributive Network to Control Irrigation using IoT, فصلنامه مدیریت فناوری اطلاعات. undefined (1402).
[77] C.X. Wang, M. Di Renzo, S. Stańczak, S. Wang, E.G. Larsson, Artificial Intelligence Enabled Wireless Networking for 5G and Beyond: Recent Advances and Future Challenges, IEEE Wireless Communications. 27 (2020) 16–23. https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900292.
[78] F. Salahdine, T. Han, N. Zhang, 5G, 6G, and Beyond: Recent advances and future challenges, Annals of Telecommunications. (2023) 1–25.
[79] 5G Infrastructure Association, European Vision for the 6G Network Ecosystem, 5G Infrastructure Association. (2021). https://doi.org/10.5281/zenodo.5007671.
[80] G. Carvalho, B. Cabral, V. Pereira, J. Bernardino, Edge computing: current trends, research challenges and future directions, Computing. 103 (2021) 993–1023.
[81] C. Kwon, I. Hwang, Reachability analysis for safety assurance of cyber-physical systems against cyber attacks, IEEE Transactions on Automatic Control. 63 (2017) 2272–2279.
[82] F. Zhang, H.A.D.E. Kodituwakku, J.W. Hines, J. Coble, Multilayer data-driven cyber-attack detection system for industrial control systems based on network, system, and process data, IEEE Transactions on Industrial Informatics. 15 (2019) 4362–4369.
[83] A. Sargolzaei, A. Abbaspour, M.A. Al Faruque, A. Salah Eddin, K. Yen, Security challenges of networked control systems, Studies in Systems, Decision and Control. 145 (2018) 77–95. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74412-4_6.
[84] E. Mousavinejad, F. Yang, Q.-L. Han, L. Vlacic, A novel cyber attack detection method in networked

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-29]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.129]