

طراحی و پیاده‌سازی شبکه‌های ارتباطی مبتنی بر فناوری ۶G با قابلیت پشتیبانی از ارتباطات بلادرز و فوق‌مطمئن در کارخانه‌های هوشمند

رضا سلیمی بنی

کارشناسی ارشد مدیریت فناوری اطلاعات گرایش سیستم‌های اطلاعاتی، پیشرفته، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الکترونیکی تهران
rezasalimi۱۹۷۷@gmail.com

چکیده

گذار از انقلاب صنعتی چهارم به پنجم (Industry ۰.۵) الزامات بی‌سابقه‌ای را برای شبکه‌های ارتباطی صنعتی ایجاد کرده است. کارخانه‌های هوشمند نسل آینده به ارتباطاتی با تأخیر زیر میلی‌ثانیه، قابلیت اطمینان نزدیک به کامل (۹۹.۹۹۹۹٪)، لرزش (jitter) در سطح میکروثانیه و هم‌زمان‌سازی با دقت بهتر از ۱۰۰ نانوثانیه نیاز دارند. شبکه‌های نسل ششم (6G) با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته‌ای نظیر ارتباطات تراهرتز (THz)، سطوح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند (RIS)، محاسبات لبه چنددسترس (MEC)، برش‌های شبکه (Slicing Network) مبتنی بر هوش مصنوعی، شبکه‌های حساس به زمان (TSN) و دوقلوهای دیجیتال (Twins Digital)، بستر مناسبی برای تحقق این الزامات فراهم می‌آورند. این مقاله به بررسی طراحی و پیاده‌سازی شبکه‌های ارتباطی ۶G برای کارخانه‌های هوشمند می‌پردازد و چارچوبی جامع برای پشتیبانی از ارتباطات بلادرز و فوق‌مطمئن ارائه می‌دهد. معماری پیشنهادی شامل لایه‌های دسترس رادیویی، لایه شبکه و لایه کاربرد با یکپارچه‌سازی فناوری‌های کلیدی ۶G است. نتایج نشان می‌دهد که شبکه‌های ۶G قادر به تحقق تأخیر سرتاسری زیر ۷ میلی‌ثانیه، نرخ داده ۱۸.۴ مگابیت بر ثانیه و قابلیت اطمینان ۹۹.۹۹۹۹٪ در محیط‌های صنعتی هستند. همچنین، پیاده‌سازی دوقلوهای دیجیتال مبتنی بر ۶G می‌تواند تأخیر هم‌زمان‌سازی را تا ۸۷٪ کاهش داده و پهنای باند موردنیاز را تا ۹۴٪ صرفه‌جویی کند.

واژگان کلیدی: 6G، کارخانه هوشمند، ارتباطات فوق‌مطمئن با تأخیر بسیار کم (URLLC)

۱. مقدمه

۱.۱. زمینه و انگیزه

انقلاب صنعتی چهارم (Industry ۴.۰) با معرفی سیستم‌های سایبر-فیزیکی، اینترنت اشیا (IoT) و اتوماسیون مبتنی بر ابر، تحولی بنیادین در تولید و اتوماسیون صنعتی ایجاد کرد (al et Ibrahim, ۲۰۲۵). با این حال، این فناوری‌ها توانایی پاسخ‌گویی به الزامات سخت‌گیرانه نسل بعدی برنامه‌های صنعتی را ندارند (al et Ibrahim, ۲۰۲۶). به‌ویژه، نیازهایی مانند تأخیر سرتاسری ۱ میلی‌ثانیه، قابلیت اطمینان ۹۹.۹۹۹٪ و زمان‌بندی قطعی (timing deterministic) که برای رباتیک همکارانه، کنترل حرکت حلقه‌بسته و دوقلوهای دیجیتال توزیع‌شده ضروری است، در Industry ۴.۰ قابل تأمین نیست (al et Ibrahim, ۲۰۲۵). گذار به Industry ۵.۰ با تأکید بر پایداری، طراحی انسان‌محور و تاب‌آوری در سطح سیستم، نیازمند ارتباطات فوق‌مطمئن با تأخیر بسیار کم (URLLC) به‌عنوان یک سرویس بنیادین برای هماهنگ‌سازی تعاملات بی‌درنگ بین انسان‌ها، ماشین‌ها و عوامل هوش مصنوعی است (al et Ibrahim, ۲۰۲۶). شبکه‌های نسل ششم (6G) با هدف دستیابی به تأخیر زیر ۰.۱ میلی‌ثانیه، دقت هم‌زمان‌سازی بهتر از ۱۰۰ نانوثانیه و لرزش در سطح میکروثانیه، این الزامات را برآورده می‌سازند (al et Ibrahim, ۲۰۲۵).

۲.۱. الزامات کلیدی 6G برای کارخانه‌های هوشمند

جدول ۱ الزامات کلیدی عملکردی (KPI) 6G را در مقایسه با 5G برای کارخانه‌های هوشمند نشان می‌دهد (al et Ibrahim, ۲۰۲۶; al et Wang, ۲۰۲۵). همان‌طور که مشاهده می‌شود، 6G بهبودی چشمگیر در تمامی شاخص‌ها ارائه می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه الزامات کلیدی عملکردی 5G و 6G برای کارخانه‌های هوشمند

شاخص عملکردی	5G	6G	بهبود
تأخیر سرتاسری	۱ میلی‌ثانیه	زیر ۰.۱ میلی‌ثانیه	۱۰ برابر
قابلیت اطمینان	۹۹٪	۹۹.۹۹۹٪	۱۰۰ برابر
لرزش (Jitter)	۱ میلی‌ثانیه	میکروثانیه	۱۰۰۰ برابر
دقت هم‌زمان‌سازی	۱ میکروثانیه	۱۰۰ نانوثانیه	۱۰ برابر
نرخ داده اوج	۲۰ گیگابیت بر ثانیه	۱۰۰+ گیگابیت بر ثانیه	۵+ برابر
چگالی دستگاه	۱۰ ^۶ دستگاه/کیلومتر مربع	۱۰ ^۷ دستگاه/کیلومتر مربع	۱۰ برابر

(منبع: برگرفته از al et Ibrahim, ۲۰۲۶; al et Wang, ۲۰۲۵)

۳.۱. ساختار مقاله

ساختار این مقاله به‌گونه‌ای طراحی شده است که ابتدا به بررسی الزامات ارتباطی کارخانه‌های هوشمند (بخش ۲) می‌پردازد. سپس فناوری‌های کلیدی ۶G برای ارتباطات بلادرز و فوق‌مطمئن شامل URLLC (بخش ۳)، شبکه‌های حساس به زمان (بخش ۴)، فناوری‌های تراهرتز و سطوح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند (بخش ۵)، برش شبکه و محاسبات لبه (بخش ۶)، و دوقلوهای دیجیتال (بخش ۷) را تشریح می‌کند. در ادامه، معماری پیشنهادی شبکه ۶G برای کارخانه‌های هوشمند (بخش ۸) و ارزیابی عملکرد (بخش ۹) ارائه می‌شود. در نهایت، چالش‌ها و جهت‌های تحقیقاتی آینده (بخش ۱۰) و نتیجه‌گیری (بخش ۱۱) آورده شده است.

۲. الزامات ارتباطی کارخانه‌های هوشمند

کارخانه‌های هوشمند نسل آینده با مجموعه‌ای از برنامه‌های کاربردی متنوع مواجه هستند که هرکدام الزامات ارتباطی خاصی دارند. Ibrahim و همکاران (۲۰۲۵) این برنامه‌ها را در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی کرده‌اند:

۱. کنترل حرکت حلقه بسته (**Control Motion Closed-Loop**): این دسته شامل کنترل دقیق ربات‌های صنعتی، ماشین‌آلات CNC و سیستم‌های موقعیت‌یابی با دقت بالا است. الزامات این دسته شامل تأخیر زیر ۱ میلی‌ثانیه، قابلیت اطمینان ۹۹.۹۹۹٪ و لرزش زیر ۱ میکروثانیه است.

۲. همکاری انسان-ربات (**Collaboration Human-Robot**): در این سناریو، انسان‌ها و ربات‌ها در یک فضای کاری مشترک فعالیت می‌کنند. ارتباطات باید از تأخیر زیر ۱ میلی‌ثانیه برای توقف اضطراری و قابلیت اطمینان فوق‌بالا برخوردار باشد تا ایمنی کارگران تضمین شود (al et Ibrahim, ۲۰۲۶).

۳. مانیتورینگ و کنترل از راه دور (**Control and Monitoring Remote**): این دسته شامل پایش بلادرنگ فرایندهای تولید، کنترل از راه دور تجهیزات و نگهداری پیش‌بینی‌کننده است. نیازمند تأخیر زیر ۱۰ میلی‌ثانیه و پهنای باند متوسط تا بالا است.

۴. دوقلوهای دیجیتال توزیع‌شده (**Twins Digital Distributed**): هم‌زمان‌سازی بلادرنگ بین اشیاء فیزیکی و همتای دیجیتال آن‌ها نیازمند تأخیر زیر ۵ میلی‌ثانیه، نرخ به‌روزرسانی بالا و پهنای باند قابل توجه است (Sammartino, ۲۰۲۶).

جدول ۲ الزامات ارتباطی هر دسته از برنامه‌های کاربردی را به صورت دقیق‌تر نشان می‌دهد.

جدول ۲: الزامات ارتباطی برنامه‌های کاربردی کلیدی در کارخانه‌های هوشمند

برنامه کاربردی	تأخیر هدف	قابلیت اطمینان	نرخ داده	لرزش
کنترل حرکت حلقه بسته	ms < 1	۹۹۹۹٪.۹۹	Mbps ۱-۱۰	$\mu s < 1$
همکاری انسان-ربات	ms < 1	۹۹۹۹۹٪.۹۹	Mbps ۱۰-۱۰۰	$\mu s < 1$
مانیتورینگ از راه دور	ms < 1۰	۹۹٪.۹۹	Mbps ۱-۱۰۰	$\mu s < 1۰۰$
دو قلو دیجیتال	ms < ۵	۹۹۹٪.۹۹	Gbps Mbps-1 ۱۰۰	$\mu s < 1۰$
بازرسی مبتنی بر بینایی	ms < ۵۰	۹٪.۹۹	Gbps Mbps-1۰ ۱۰۰	-
وسایل نقلیه خودران	ms < 1۰	۹۹۹٪.۹۹	Mbps ۱۰-۱۰۰	$\mu s < 1۰$

(منبع: برگرفته از al et Ibrahim, ۲۰۲۵; ۳GPP, ۲۰۲۵)

۳. ارتباطات فوق‌مطمئن با تأخیر بسیار کم (URLLC) در ۶G

۱.۳. مبانی و تعاریف

URLLC به عنوان یکی از ستون‌های اصلی ۵G معرفی شد و در ۶G با عنوان Low Reliable Hyper) HRLLC (Communication Latency) تکامل یافته است (IIS, Fraunhofer, ۲۰۲۵). در ۶G، مرزهای عملکردی به طور قابل توجهی جابه‌جا شده‌اند: تأخیر تا ۱ میلی‌ثانیه و قابلیت اطمینان $5-10^{-9}$ (۹۹.۹۹۹٪) برای شبکه‌های ۶G امکان‌پذیر است که حتی برنامه‌های حیاتی و ایمنی را نیز پشتیبانی می‌کند (IIS, Fraunhofer, ۲۰۲۵).

Ibrahim و همکاران (۲۰۲۶) در مرور جامع خود، رویکردهای مختلف URLLC را در چهار سطح طبقه‌بندی کرده‌اند: (۱) روش‌های لایه فیزیکی، (۲) روش‌های لایه MAC و شبکه، (۳) روش‌های لایه کاربرد، و (۴) روش‌های چندلایه و میان‌لایه‌ای (cross-layer).

۲.۳. تکنیک‌های کلیدی URLLC در ۶G

۱.۲.۳. رژیم طول بلوک محدود (Regime Blocklength Finite)

در ۶G، به‌منظور دستیابی به تأخیرهای زیر میلی‌ثانیه، طول بلوک‌های کدگذاری شده به‌شدت محدود می‌شود. این رویکرد با رژیم طول بلوک نامحدود در 5G تفاوت اساسی دارد. تحلیل‌های نظری نشان می‌دهد که در رژیم طول بلوک محدود، نرخ قابل‌دستیابی با تابعی از طول بلوک، نسبت سیگنال به نویز و احتمال خطا تعیین می‌شود (al et Ibrahim, ۲۰۲۶). این تحلیل برای طراحی سیستم‌های URLLC در محیط‌های صنعتی که بسته‌های داده کوچک ولی بسیار حیاتی ارسال می‌شوند، حیاتی است.

۲.۲.۳. بهینه‌سازی میان‌لایه‌ای (Optimization Cross-Layer)

یکی از رویکردهای کلیدی برای تحقق URLLC در ۶G، بهینه‌سازی میان‌لایه‌ای است که در آن پارامترهای لایه‌های مختلف شبکه به‌صورت هم‌زمان بهینه می‌شوند (al et Ibrahim, ۲۰۲۶). این رویکرد شامل هماهنگ‌سازی بین لایه‌فیزیکی (انتخاب مدولاسیون و کدینگ)، لایه MAC (برنامه‌ریزی و اولویت‌بندی) و لایه شبکه (مسیریابی و کنترل ازدحام) است.

۳.۲.۳. برنامه‌ریزی و هماهنگ‌سازی در لبه شبکه

محاسبات لبه چنددسترسی (MEC) نقش کلیدی در کاهش تأخیر سرتاسری ایفا می‌کند. با انتقال پردازش‌های سنگین به لبه شبکه، تأخیر سیر رفت و برگشت به سرورهای ابری حذف می‌شود (al et Wang, ۲۰۲۵). در کارخانه‌های هوشمند، MEC امکان اجرای الگوریتم‌های کنترل بلادرنگ، پردازش داده‌های حسگرها و تصمیم‌گیری‌های محلی را فراهم می‌کند.

۳.۳. چالش‌های پیاده‌سازی URLLC

علیرغم پیشرفت‌های قابل‌توجه، پیاده‌سازی URLLC در محیط‌های صنعتی با چالش‌هایی مواجه است (al et Ibrahim, ۲۰۲۶):

۱. محیط‌های پیچیده و پویا: کارخانه‌ها دارای سطوح فلزی بزرگ، تجهیزات متحرک و تداخل‌های الکترومغناطیسی متعدد هستند که کیفیت کانال را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند (IIS, Fraunhofer, ۲۰۲۵).
۲. مقیاس‌پذیری: با افزایش تعداد دستگاه‌های متصل (پیش‌بینی شده تا 10^7 دستگاه در کیلومترمربع)، مدیریت منابع و تضمین کیفیت سرویس برای همه دستگاه‌ها به‌طور هم‌زمان چالش‌برانگیز می‌شود.
۳. مصرف انرژی: دستیابی به قابلیت اطمینان بالا و تأخیر کم معمولاً با مصرف انرژی بیشتر همراه است. بهینه‌سازی مصرف انرژی در کنار الزامات URLLC یکی از چالش‌های اساسی است (al et Ibrahim, ۲۰۲۶).

۴. شبکه‌های حساس به زمان (TSN) و یکپارچه‌سازی با G

۱.۴. مفاهیم پایه TSN

شبکه‌های حساس به زمان (TSN - Networking Time-Sensitive) مجموعه‌ای از استانداردهای IEEE هستند که قابلیت‌های ارتباطی قطعی (deterministic) را به اترنت استاندارد اضافه می‌کنند (IEEE, ۲۰۲۵). TSN با تضمین تأخیر برای تحویل داده‌ها، الزامات بلادرز سخت‌افزاری برنامه‌های صنعتی را بدون نیاز به الحاقیه‌های اختصاصی برآورده می‌سازد (IEEE, ۲۰۲۵). TSN به‌عنوان جایگزین بلندمدت فناوری‌های سیمی سنتی برای موارد استفاده صنعتی پیش‌بینی می‌شود.

استاندارد IEEE ۸۰۲.۱AS (که به‌عنوان gPTP یا Protocol Time Precision Generalized شناخته می‌شود) هم‌زمان‌سازی ساعت را در شبکه فراهم می‌کند و سیستم‌های نهایی را با دقت بالا هم‌زمان می‌سازد (IEEE, ۲۰۲۵). این پروتکل اطلاعات ساعت را از یک گره منبع (GrandMaster) به تمام گره‌های TSN در همان دامنه ساعت توزیع می‌کند.

۲.۴. یکپارچه‌سازی G/G_۵ و TSN

پروژه مشارکت نسل سوم (۳GPP) یکپارچه‌سازی سیستم‌های G_۵ و TSN را از نسخه ۱۶ آغاز کرد و بهبودهای بعدی در نسخه ۱۷ ارائه شد (۳GPP, ۲۰۲۵). در این یکپارچه‌سازی، سیستم G_۵ به‌عنوان یک یا چند پل TSN منطقی در نظر گرفته می‌شود. معرفی G/G_۵ در کارخانه‌های فعلی به‌عنوان فرایندی تدریجی است که در آن اتصالات سیمی به‌تدریج با اتصالات بی‌سیم جایگزین می‌شوند (IEEE, ۲۰۲۵).

با تأخیرهای پشتیبانی‌شده توسط G_۵، جریان‌های داده مانند دستگاه-به-محاسبه یا کنترل‌کننده-به-کنترل‌کننده برای انتقال بی‌سیم مناسب هستند. با این حال، جریان‌های داده با چرخه‌های زمانی سریع‌تر مانند کنترل‌کننده-به-دستگاه نیاز به ارتقای فناوری برای کاهش تأخیر دارند (IEEE, ۲۰۲۵). G_۶ پیش‌بینی می‌شود که محدودیت‌های G_۵ را برطرف کرده و جایگزینی اتصالات سیمی را برای جریان‌های داده با الزامات تأخیر سخت‌گیرانه‌تر تسهیل کند.

۳.۴. برنامه‌ریزی مشترک gPTP و ترافیک داده صنعتی

یکی از چالش‌های کلیدی در یکپارچه‌سازی TSN و G_۶، برنامه‌ریزی مشترک پروتکل هم‌زمان‌سازی gPTP و ترافیک داده صنعتی است (IEEE, ۲۰۲۵). در شبکه‌های ترکیبی سیمی-بی‌سیم، هم‌زمان‌سازی دقیق ساعت بین گره‌های مختلف برای عملکرد صحیح برنامه‌های بلادرز حیاتی است. با این حال، استفاده از سیستم‌های G_۵ در محیط‌های صنعتی چالش‌برانگیز است زیرا تأخیرهای بالا (زمان‌های اقامت بالا) می‌توانند تأثیر کلاک دریافت را بر دقت زمان‌بندی کلی افزایش دهند (IEEE, ۲۰۲۵).

IIS Fraunhofer (۲۰۲۵) بر این باور است که TSN و ارتباطات سیار ترکیبی ایده‌آل را تشکیل می‌دهند و بر روی مکانیزم‌ها و ابزارهایی برای استفاده از TSN در برنامه‌های بی‌سیم تحقیق می‌کنند. TSN مانند یک رهبر ارکستر عمل می‌کند که همه

چیز را هماهنگ می‌سازد: با تخصیص مسیرهای شبکه ثابت، بسته‌های اطلاعاتی مختلف به‌گونه‌ای هم‌زمان و اولویت‌بندی می‌شوند که ترافیک داده‌های زمان‌بحرانی همیشه به‌موقع می‌رسد.

۵. فناوری‌های تراهرتز و سطوح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند

۱.۵. ارتباطات تراهرتز (THz)

ارتباطات تراهرتز (باند ۰.۱ تا ۱۰ THz) به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی ۶G برای دستیابی به نرخ‌های داده بالا (تا ۱ ترابیت بر ثانیه) و تأخیرهای بسیار کم مطرح شده است (al et Ibrahim, ۲۰۲۵). در کارخانه‌های هوشمند، ارتباطات THz می‌تواند برای انتقال داده‌های حجیم از حسگرهای پیشرفته، سیستم‌های بینایی ماشین و اسکنرهای سه‌بعدی استفاده شود.

با این حال، ارتباطات THz با چالش‌هایی مانند تضعیف شدید در مسافت‌های طولانی، حساسیت به مسدودشدگی و نیاز به دید مستقیم (Line-of-Sight) مواجه است (al et Ibrahim, ۲۰۲۶). برای رفع این چالش‌ها، ترکیب THz با فناوری‌های دیگر مانند RIS و MIMO پیشنهاد شده است.

۲.۵. سطوح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند (RIS)

سطوح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند (RIS - Surfaces Intelligent Reconfigurable) سطوحی هستند که می‌توانند امواج الکترومغناطیسی ورودی را در جهت‌های دلخواه بازتاب دهند و بدین ترتیب محیط انتشار را به‌صورت هوشمند کنترل کنند (al et Wang, ۲۰۲۵). RIS با ایجاد محیط‌های انتشار هوشمند، می‌تواند تضعیف مسیر و پراکندگی کانال را به‌طور مؤثر کاهش دهد.

در کارخانه‌های هوشمند، RIS می‌تواند بر روی دیوارها، سقف‌ها یا حتی تجهیزات نصب شود تا مناطق مرده (zones dead) را حذف کرده و پوشش را بهبود بخشد (IPTEC, ۲۰۲۶). همچنین، RIS امکان تمرکز دقیق سیگنال در محیط‌های صنعتی را فراهم می‌کند که برای اتصال هزاران حسگر بدون تداخل ضروری است (IPTEC, ۲۰۲۶).

۳.۵. یکپارچه‌سازی THz و RIS

تحقیقات اخیر چارچوب‌های یکپارچه‌ای را برای ترکیب RIS با ارتباطات THz و دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA) به‌منظور بهبود ارتباطات صنعتی هوشمند ارائه داده‌اند (Arxiv, ۲۰۲۵). این چارچوب یکپارچه با بهره‌گیری از قابلیت‌های RIS

در هدایت امواج THZ و مزایای NOMA در افزایش بازده طیفی، الزامات کلیدی قابلیت اطمینان و تأخیر را برای اتوماسیون صنعتی و ارتباطات بلادرز در شبکه‌های ۶G آینده برآورده می‌سازد (Arxiv, ۲۰۲۵).

در پروژه‌های پیش‌توسعه ۶G شرکت‌هایی مانند هواوی و زدتی‌ای، برنامه‌ریزی شده است که تا سال ۲۰۲۸ استقرار تجاری THZ-RIS محقق شود، با هدف فشردن ساختار تأخیر سرتاسری MFM به ۰.۱ میلی‌ثانیه و افزایش نرخ داده به ۱ ترابیت بر ثانیه (Eefocus, RF, ۲۰۲۵).

۶. برش شبکه و محاسبات لبه در ۶G

۱.۶. برش شبکه (Slicing Network)

برش شبکه به‌عنوان یکی از قابلیت‌های کلیدی ۵G معرفی شد و در G-Advanced و ۶G بهبود یافته است (Ibrahim et al, ۲۰۲۶). برش شبکه امکان ایجاد چندین شبکه منطقی مجازی بر روی یک زیرساخت فیزیکی مشترک را فراهم می‌کند که هرکدام با ویژگی‌های عملکردی خاص خود طراحی شده‌اند. در کارخانه‌های هوشمند، برش‌های شبکه مختلف می‌توانند برای برنامه‌های کاربردی با الزامات متفاوت مانند کنترل بلادرز (تأخیر بسیار کم)، مانیتورینگ ویدئویی (پهنای باند بالا) و اینترنت اشیا صنعتی (چگالی بالا) اختصاص داده شوند.

یک مطالعه اخیر چارچوب بهینه‌سازی تأخیر را برای سیستم‌های کنترل ربات صنعتی با استفاده از فناوری‌های برش شبکه ۶G ارائه داده است (Communications, IET, ۲۰۲۵). در این مطالعه، یک مدل سوئیچینگ الاستیک مبتنی بر الگوریتم Gale-Shapley برای تطبیق پویای کنترل‌کننده‌های ربات با برش‌های شبکه بهینه و ایستگاه‌های پایه در شرایط حساس به تأخیر پیشنهاد شده است (Communications, IET, ۲۰۲۵). همچنین، یک ساختار رمزگذار-رمزگشا مبتنی بر حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTM) برای تخصیص پیش‌بینی‌کننده منابع در بین برش‌ها توسعه یافته است (Communications, IET, ۲۰۲۵).

نتایج شبیه‌سازی این مطالعه نشان می‌دهد که سازوکار تطبیق پیشنهادی به نرخ موفقیت ۹۱.۱۶٪ برای دسترسی به برش و نرخ دسترسی به ایستگاه پایه ۹۰.۸۳٪ دست یافته است که نسبت به طرح‌های تطبیق یکپارچه و دو مرحله‌ای معمولی عملکرد بهتری دارد (Communications, IET, ۲۰۲۵). تخصیص منابع مبتنی بر LSTM به خطای مطلق میانگین ۰.۰۴ و نرخ نقض زیر ۱۰٪ دست یافته است و بیش از ۹۲٪ از منابع گره و پیوند استفاده می‌شود (Communications, IET, ۲۰۲۵). شبیه‌سازی‌های تجربی تأخیر سرتاسری پایدار زیر ۷ میلی‌ثانیه و توان عملیاتی ۱۸.۴ مگابیت بر ثانیه را نشان می‌دهند (Communications, IET, ۲۰۲۵).

۲.۶. محاسبات لبه چنددسترسی (MEC)

محاسبات لبه چنددسترسی (MEC - Computing Edge Multi-access) به‌عنوان یکی از نوآوری‌های کلیدی در معماری شبکه ۶G برای پاسخگویی به الزامات سخت‌گیرانه تأخیر مطرح شده است (al et Wang, ۲۰۲۵). MEC با انتقال قابلیت‌های محاسباتی و ذخیره‌سازی به لبه شبکه (نزدیک به کاربران و دستگاه‌ها)، تأخیر سیر رفت و برگشت به مراکز داده ابری را به‌شدت کاهش می‌دهد.

در کارخانه‌های هوشمند، MEC مزایای متعددی ارائه می‌دهد (al et Wang, ۲۰۲۵):

۱. پردازش بلادرنگ داده‌های حسگر: داده‌های حسگرها در لبه پردازش می‌شوند و تصمیم‌گیری‌های کنترلی با حداقل تأخیر انجام می‌شود.
۲. کاهش پهنای باند موردنیاز: با پردازش و فشرده‌سازی داده‌ها در لبه، تنها داده‌های خلاصه‌شده به ابر ارسال می‌شوند.
۳. افزایش قابلیت اطمینان: در صورت قطع ارتباط با ابر، سیستم‌های لبه می‌توانند به‌طور مستقل به کار خود ادامه دهند.
۴. پشتیبانی از هوش مصنوعی در لبه: اجرای مدل‌های یادگیری ماشین در لبه امکان تصمیم‌گیری هوشمند و تطبیقی را فراهم می‌کند.

۷. دوقلوهای دیجیتال و هم‌زمان‌سازی در ۶G

۱.۷. مفهوم دوقلو دیجیتال

دوقلو دیجیتال (DT - Twin Digital) به‌عنوان یکی از ارکان اصلی چشم‌انداز ۶G در حال ظهور است که امکان انعکاس بلادرنگ سایبر-فیزیکی را برای تولید هوشمند، وسایل نقلیه خودران و مراقبت‌های بهداشتی از راه دور فراهم می‌کند (Sammartino, ۲۰۲۶). یک DT یک نسخه مجازی است که به‌طور پیوسته به‌روزرسانی می‌شود و همتای فیزیکی خود را از یک بازوی رباتیک صنعتی گرفته تا یک شهر هوشمند کامل، منعکس می‌سازد و امکان مانیتورینگ بلادرنگ، تحلیل پیش‌بینی‌کننده و کنترل خودمختار حلقه‌بسته را فراهم می‌آورد (Sammartino, ۲۰۲۶).

با این حال، تحقق این چشم‌انداز در مقیاس بزرگ با یک تضاد اساسی مواجه است: وفاداری هم‌زمان‌سازی موردنیاز برای برنامه‌های DT با حجم عظیم داده‌های خام حسگر که باید به‌طور پیوسته در شبکه دسترسی رادیویی منتقل شوند، در تضاد است (Sammartino, ۲۰۲۶).

۲.۷. چارچوب SA-DTS برای هم‌زمان‌سازی کارآمد

Sammartino (۲۰۲۶) چارچوب SA-DTS (Synchronization Twin Digital Semantic-Aware) را برای هم‌زمان‌سازی کارآمد دوقلوهای دیجیتال از طریق شبکه‌های ۶G پیشنهاد کرده است. این چارچوب لوله‌ی هم‌زمان‌سازی را به‌طور بنیادین بازتعریف می‌کند: به‌جای ارسال داده‌های خام حسگر یا ویدئو، یک رمزگذار معنایی عصبی سبک در منبع دنیای فیزیکی فقط ویژگی‌های مرتبط با وظیفه را استخراج کرده و توصیف‌گرهای معنایی فشرده را از طریق رابط هوایی ۶G ارسال می‌کند (Sammartino, ۲۰۲۶). در نسخه DT، یک رمزگشا همراه با یک گراف دانش پویا، وضعیت زمینه کامل را بازسازی می‌کند (Sammartino, ۲۰۲۶).

نتایج شبیه‌سازی‌های گسترده بر روی سه وظیفه استاندارد DT (کنترل ربات صنعتی، پایش بیمار و همراهی وسایل نقلیه) نشان می‌دهد که این چارچوب می‌تواند به صرفه‌جویی پهنای باند تا ۹۴٪، کاهش تأخیر هم‌زمان‌سازی سرتاسری تا ۸۷٪ و دقت بازسازی وضعیت با کمک گراف دانش بیش از ۹۷٪ دست یابد (Sammartino, ۲۰۲۶). این نتایج نشان می‌دهند که ارتباطات معنایی نه‌تنها یک ابزار فشرده‌سازی است، بلکه یک توانمندساز اساسی برای اکوسیستم‌های DT واقعاً بلادرز و مقیاس‌پذیر محسوب می‌شود (Sammartino, ۲۰۲۶).

۳.۷. کاربردهای دوقلوی دیجیتال در کارخانه‌های هوشمند

پروژه PRIME-G6 که با بودجه ۷.۷۶ میلیون یورویی از برنامه Europe Horizon اتحادیه اروپا تأمین مالی شده است، به‌طور خاص به پیاده‌سازی دوقلوهای دیجیتال در محیط‌های تولید صنعتی می‌پردازد (PRIME-G6, ۲۰۲۶). این پروژه حول دو مورد استفاده مکمل ساختار یافته است:

AURORA (Automation Resilient via Operations Robotics Unified Advanced): به

بررسی چگونگی اتصال قطعی ۶G در ارتباط سیستم‌های کنترل ربات مجازی با ربات‌های صنعتی می‌پردازد و الزامات سخت‌گیرانه تأخیر و قابلیت اطمینان اتوماسیون بلادرز را برآورده می‌سازد (PRIME-G6, ۲۰۲۶).

SENTINEL (Sensing-Enhanced Twin Network Intelligent for Environments in Manufacturing): از هم‌آمیزی حسگرهای چندگانه برای ساخت دوقلوهای دیجیتال بلادرز از محیط‌های صنعتی پویا

استفاده می‌کند. با استفاده مجدد از زیرساخت G/6G موجود برای پایش مداوم محیطی، SENTINEL آگاهی موقعیتی را افزایش می‌دهد، هماهنگی ربات‌ها را بهبود می‌بخشد و نیاز به سخت‌افزار حسگر اختصاصی را کاهش می‌دهد (PRIME-G6, ۲۰۲۶).

۸. معماری پیشنهادی شبکه ۶G برای کارخانه‌های هوشمند

بر اساس بررسی فناوری‌های کلیدی ارائه‌شده در بخش‌های قبلی، معماری پیشنهادی برای شبکه ۶G کارخانه‌های هوشمند در این بخش ارائه می‌شود. این معماری شامل سه لایه اصلی است:

۱.۸. لایه دسترسی رادیویی (Layer Access Radio)

لایه دسترسی رادیویی شامل اجزای زیر است:

۱. ایستگاه‌های پایه ۶G با قابلیت MIMO انبوه: استقرار ایستگاه‌های پایه با آرایه‌های آنتن بزرگ برای پوشش دهی مناسب در محیط‌های صنعتی.
۲. سطوح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند (RIS): نصب RIS بر روی دیوارها، سقف‌ها و تجهیزات برای حذف مناطق مرده و بهبود کیفیت سیگنال.
۳. ارتباطات تراهرتز (THz): برای برنامه‌های با پهنای باند بسیار بالا مانند بازرسی مبتنی بر بینایی و اسکن سه‌بعدی.
۴. پشتیبانی از باندهای فرکانسی متعدد: از جمله باندهای زیر ۶ گیگاهرتز، موج‌های میلی‌متری و تراهرتز برای انعطاف‌پذیری بیشتر.

۲.۸. لایه شبکه (Layer Network)

لایه شبکه شامل اجزای زیر است:

۱. برش‌های شبکه (Slices Network): ایجاد برش‌های شبکه مجزا برای برنامه‌های کاربردی مختلف با الزامات عملکردی متفاوت. حداقل سه برش اصلی پیشنهاد می‌شود: برش کنترل بلادرز (URLLC)، برش مانیتورینگ و داده (eMBB) و برش اینترنت اشیا انبوه (mMTC).
۲. محاسبات لبه چنددسترسی (MEC): استقرار گره‌های MEC در سراسر کارخانه برای پردازش بلادرنگ داده‌ها و اجرای الگوریتم‌های کنترل.
۳. یکپارچه‌سازی TSN: پشتیبانی از استانداردهای TSN برای ارتباطات قطعی و هم‌زمان‌سازی دقیق.
۴. شبکه‌سازی مبتنی بر نرم‌افزار (SDN): کنترل متمرکز و برنامه‌ریزی پویای منابع شبکه.

۳.۸. لایه کاربرد و مدیریت (Layer Management and Application)

لایه کاربرد و مدیریت شامل اجزای زیر است:

۱. مدیریت مبتنی بر هوش مصنوعی: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تخصیص پویای منابع، پیش‌بینی ترافیک و مدیریت تداخل.

۲. دوقلوهای دیجیتال: ایجاد و نگهداری دوقلوهای دیجیتال از تجهیزات، فرایندها و کل کارخانه برای مانیتورینگ، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی.
۳. هماهنگ‌سازی انسان-ربات: پشتیبانی از تعامل بلادراز و ایمن بین انسان‌ها و ربات‌ها.
۴. نگهداری پیش‌بینی‌کننده: استفاده از تحلیل داده‌ها برای پیش‌بینی خرابی‌ها و برنامه‌ریزی نگهداری.

جدول ۳: اجزای معماری پیشنهادی و فناوری‌های کلیدی مرتبط

لایه	مؤلفه	فناوری‌های کلیدی	مراجع
دسترسی رادیویی	ایستگاه‌های پایه	MIMO، انبوه، باندهای فرکانسی متعدد	al et Ibrahim, ۲۰۲۵
دسترسی رادیویی	بهبود پوشش	RIS، ارتباطات THz	al et Wang, ۲۰۲۵; Arxiv, ۲۰۲۵
شبکه	مجازی‌سازی	برش شبکه، SDN	Communications, IET, ۲۰۲۵
شبکه	پردازش لبه	MEC، محاسبات لبه-ابر	al et Wang, ۲۰۲۵
شبکه	ارتباط قطعی	gPTP، TSN	IIS, Fraunhofer ۲۰۲۵; IEEE,
کاربرد و مدیریت	هوش مصنوعی	LSTM، یادگیری تقویتی	Communications, IET, ۲۰۲۵
کاربرد و مدیریت	دوقلو دیجیتال	SA-DTS، گراف دانش	Sammartino, ۲۰۲۶
کاربرد و مدیریت	هماهنگ‌سازی	HRLLC، URLLC	al et Ibrahim, ۲۰۲۶

۹. ارزیابی عملکرد

۱.۹. معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد شبکه ۶G در کارخانه‌های هوشمند، معیارهای زیر در نظر گرفته شده‌اند:

۱. تأخیر سر تا سر (Latency End-to-End): زمان بین ارسال داده از فرستنده تا دریافت در گیرنده.
۲. قابلیت اطمینان (Reliability): احتمال تحویل موفقیت‌آمیز بسته در بازه زمانی مشخص.
۳. لرزش (Jitter): تغییرات تأخیر در طول زمان.
۴. توان عملیاتی (Throughput): نرخ داده قابل ارسال در واحد زمان.

۵. مقیاس پذیری (**Scalability**): توانایی شبکه در پشتیبانی از تعداد فزاینده دستگاه‌ها.

۲.۹. نتایج شبیه‌سازی

نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که شبکه‌های ۶G می‌توانند الزامات سخت‌گیرانه کارخانه‌های هوشمند را برآورده سازند:

۱. **تأخیر و توان عملیاتی:** چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر برش شبکه و LSTM به تأخیر سرتاسری پایدار زیر ۷ میلی‌ثانیه و توان عملیاتی ۱۸.۴ مگابیت بر ثانیه دست یافته است (Communications, IET, ۲۰۲۵).
۲. **هم‌زمان‌سازی دوقلوی دیجیتال:** چارچوب SA-DTS صرفه‌جویی پهنای باند تا ۹۴٪ و کاهش تأخیر هم‌زمان‌سازی تا ۸۷٪ را نشان داده است (Sammartino, ۲۰۲۶).
۳. **تشخیص عیب مبتنی بر دوقلوی دیجیتال:** یک چارچوب دوقلوی دیجیتال مبتنی بر ۶G به دقت تشخیص عیب ۹۷.۷٪ با تأخیر سرتاسری ۰.۸ میلی‌ثانیه دست یافته است که بهبود ۵.۲۵ برابری نسبت به شبکه‌های G5 (با تأخیر ۴.۲ میلی‌ثانیه) را نشان می‌دهد (Arxiv, ۲۰۲۵).
۴. **کنترل ربات صنعتی:** مدل تطبیق الاستیک مبتنی بر الگوریتم Gale-Shapley به نرخ موفقیت ۹۱.۱۶٪ برای دسترسی به برش شبکه دست یافته است (Communications, IET, ۲۰۲۵).

جدول ۴: خلاصه نتایج عملکردی کلیدی

معیار عملکردی	مقدار	مرجع
تأخیر سرتاسری	$ms < 7$	Communications, IET, ۲۰۲۵
تأخیر سرتاسری (دوقلوی دیجیتال)	$ms 8.0$	Arxiv, ۲۰۲۵
توان عملیاتی	Mbps 4.18	Communications, IET, ۲۰۲۵
صرفه‌جویی پهنای باند (DT)	تا ۹۴٪	Sammartino, ۲۰۲۶
کاهش تأخیر هم‌زمان‌سازی (DT)	تا ۸۷٪	Sammartino, ۲۰۲۶
دقت تشخیص عیب (DT)	۹۷.۷٪	Arxiv, ۲۰۲۵
نرخ موفقیت دسترسی به برش	۹۱.۱۶٪	Communications, IET, ۲۰۲۵
استفاده از منابع	$92\% >$	Communications, IET, ۲۰۲۵

۱۰. چالش‌ها و جهت‌های تحقیقاتی آینده

۱.۱۰. چالش‌های فنی

علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌های متعددی در مسیر پیاده‌سازی شبکه‌های ۶G برای کارخانه‌های هوشمند وجود دارد (al et Ibrahim, ۲۰۲۶):

۱. پیچیدگی محیط‌های صنعتی: وجود سطوح فلزی بزرگ، تجهیزات متحرک و تداخل‌های الکترومغناطیسی متعدد، کیفیت کانال را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. توسعه مدل‌های کانال دقیق برای محیط‌های صنعتی و طراحی الگوریتم‌های مقاوم در برابر این چالش‌ها ضروری است.
۲. مقیاس‌پذیری و مدیریت منابع: با افزایش تعداد دستگاه‌های متصل (پیش‌بینی شده تا ۷۸۱۰ دستگاه در کیلومتر مربع)، مدیریت منابع و تضمین کیفیت سرویس برای همه دستگاه‌ها به‌طور هم‌زمان چالش‌برانگیز می‌شود. توسعه الگوریتم‌های تخصیص منابع مقیاس‌پذیر مبتنی بر هوش مصنوعی یکی از جهت‌های تحقیقاتی کلیدی است.
۳. امنیت و حریم خصوصی: افزایش تعداد دستگاه‌های متصل و حساسیت داده‌های صنعتی، نیازمند راه‌حل‌های امنیتی پیشرفته است. تحقیقات در زمینه امنیت سایبری برای شبکه‌های ۶G صنعتی از اهمیت بالایی برخوردار است.
۴. مصرف انرژی: دستیابی به قابلیت اطمینان بالا و تأخیر کم معمولاً با مصرف انرژی بیشتر همراه است. بهینه‌سازی مصرف انرژی در کنار الزامات URLLC یکی از چالش‌های اساسی است (al et Ibrahim, ۲۰۲۶).
۵. هم‌زیستی با فناوری‌های موجود: کارخانه‌های موجود دارای تجهیزات و پروتکل‌های ارتباطی متنوعی هستند. یکپارچه‌سازی ۶G با این فناوری‌ها و انتقال تدریجی به شبکه‌های ۶G نیازمند راه‌حل‌های هم‌زیستی هوشمند است.

۲.۱۰. جهت‌های تحقیقاتی آینده

بر اساس مرور جامع Ibrahim و همکاران (۲۰۲۶)، جهت‌های تحقیقاتی آینده در زمینه URLLC برای Industry ۵.۰ شامل موارد زیر است:

۱. ارتباطات معنایی (**Communication Semantic**): توسعه روش‌های ارتباطی مبتنی بر معنا که تنها اطلاعات مرتبط با وظیفه را ارسال می‌کنند و بدین ترتیب پهنای باند موردنیاز را به شدت کاهش می‌دهند (Sammartino, ۲۰۲۶).
۲. یادگیری ماشین در لبه شبکه: توسعه الگوریتم‌های یادگیری ماشین توزیع‌شده که در گره‌های لبه اجرا می‌شوند و امکان تصمیم‌گیری بلادرنگ و تطبیقی را فراهم می‌کنند.
۳. یکپارچه‌سازی سنجش و ارتباطات (**ISAC**): توسعه سیستم‌هایی که هم‌زمان وظایف ارتباطی و سنجشی را انجام می‌دهند و از زیرساخت ارتباطی برای پایش محیط استفاده می‌کنند (PRIME-GT, ۲۰۲۶).
۴. شبکه‌های خودمختار (**Networks Autonomous**): توسعه شبکه‌هایی که بتوانند به‌طور خودکار خود را پیکربندی، بهینه‌سازی و ترمیم کنند.

۵. هم‌زمان‌سازی پیشرفته: توسعه روش‌های هم‌زمان‌سازی با دقت بالاتر و تأخیر کمتر برای پشتیبانی از برنامه‌های بلادرز صنعتی.
۶. یکپارچه‌سازی زمینی-فضایی-هوایی: استفاده از ماهواره‌ها و پهپادها برای افزایش پوشش و قابلیت اطمینان در کارخانه‌های بزرگ و توزیع شده (al et Wang, ۲۰۲۵).

۱۱. نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی طراحی و پیاده‌سازی شبکه‌های ارتباطی مبتنی بر فناوری ۶G با قابلیت پشتیبانی از ارتباطات بلادرز و فوق‌مطمئن در کارخانه‌های هوشمند پرداخته است. گذار از Industry ۴.۰ به Industry ۵.۰ الزامات بی‌سابقه‌ای را برای شبکه‌های ارتباطی صنعتی ایجاد کرده است که شبکه‌های 5G قادر به تأمین آن‌ها نیستند. شبکه‌های ۶G با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته‌ای نظیر ارتباطات ترابری، سطوح بازپیکربندی‌پذیر هوشمند، محاسبات لبه چنددسترسی، برش‌های شبکه مبتنی بر هوش مصنوعی، شبکه‌های حساس به زمان و دوقلوهای دیجیتال، بستر مناسبی برای تحقق این الزامات فراهم می‌آورند.

معماری پیشنهادی این مقاله شامل سه لایه اصلی (دسترسی رادیویی، شبکه، و کاربرد و مدیریت) با یکپارچه‌سازی فناوری‌های کلیدی ۶G است. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که شبکه‌های ۶G قادر به تحقق تأخیر سرتاسری زیر ۷ میلی‌ثانیه، نرخ داده ۱۸.۴ مگابیت بر ثانیه و قابلیت اطمینان ۹۹.۹۹۹۹٪ در محیط‌های صنعتی هستند. همچنین، پیاده‌سازی دوقلوهای دیجیتال مبتنی بر ۶G با استفاده از چارچوب‌های ارتباط معنایی می‌تواند تأخیر هم‌زمان‌سازی را تا ۸۷٪ کاهش داده و پهنای باند موردنیاز را تا ۹۴٪ صرفه‌جویی کند.

با این حال، چالش‌های متعددی از جمله پیچیدگی محیط‌های صنعتی، مقیاس‌پذیری، امنیت، مصرف انرژی و هم‌زیستی با فناوری‌های موجود در مسیر پیاده‌سازی گسترده شبکه‌های ۶G در کارخانه‌های هوشمند وجود دارد. جهت‌های تحقیقاتی آینده شامل ارتباطات معنایی، یادگیری ماشین در لبه شبکه، یکپارچه‌سازی سنجش و ارتباطات، شبکه‌های خودمختار و یکپارچه‌سازی زمینی-فضایی-هوایی است.

پروژه‌های تحقیقاتی متعددی مانند PRIME-G6 در اروپا و طرح‌های توسعه ۶G در کشورهای دیگر، گام‌های مؤثری در جهت تحقق کارخانه‌های هوشمند مبتنی بر ۶G برداشته‌اند. با ادامه تحقیقات و توسعه‌های فناورانه، انتظار می‌رود که شبکه‌های ۶G تا دهه آینده به‌عنوان زیرساخت اصلی کارخانه‌های هوشمند نسل آینده نقش‌آفرینی کنند و انقلابی در اتوماسیون صنعتی، بهره‌وری و ایمنی ایجاد نمایند.

منابع

۱. ۳GPP). ۲۰۲۰. (Release ۱۷ enhancements for ۵G and TSN integration. ۳rd Generation Partnership Project.
۲. Arxiv). ۲۰۲۰. (TeraRIS NOMA-MIMO communications for 5G and beyond industrial networks. arXiv preprint.
۳. Arxiv). ۲۰۲۰. (5G-enabled digital twin framework for real-time cyber-physical systems :An experimental validation with industrial bearing fault detection. arXiv preprint.
۴. Fraunhofer IIS). ۲۰۲۰. (5G für industrielle Kommunikation. Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS. Retrieved from <https://www.iis.fraunhofer.de>
۵. Ibrahim, A .M., Nordin, R., Khamayseh, Y .S .M., Amphawan, A., & Jasser, M .B). ۲۰۲۰. (URLLC for 5G enabled industry ۴.۰ :A taxonomy of architectures, cross layer techniques, and time critical applications. ICT Express. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2020.05.001>
۶. Ibrahim, A .M., Nordin, R., Khamayseh, Y .S .M., Amphawan, A., & Jasser, M .B). ۲۰۲۰. (URLLC for 5G enabled industry ۴.۰ :A taxonomy of architectures, cross layer techniques, and time critical applications. ICT Express, Available online ۱۹ May ۲۰۲۰.
۷. IEEE). ۲۰۲۰. (Joint scheduling of IEEE 802.1AS gPTP and industrial data traffic in TSN- 5G networks. IEEE Transactions on Industrial Informatics.
۸. IET Communications). ۲۰۲۰. (Adaptive network slicing and LSTM-based resource allocation for real-time industrial robot control in 5G networks. IET Communications, ۱۹(۱). (<https://doi.org/10.1049/cmu2.70080>
۹. IPTEC). ۲۰۲۰. (Cooperative smart surfaces :The future of 5G connectivity. IPTEC Research Center.
۱۰. PRIME- 5G). ۲۰۲۰. (Pilot for resilient industrial manufacturing environments with 5G technologies. Horizon Europe Project. Retrieved from <https://prime-5g.eu>
۱۱. RF Eefocus). ۲۰۲۰. (太赫兹与智能反射面 : 5G如何重塑M2M. RF Technology Community.
۱۲. Sammartino, V). ۲۰۲۰. (SA-DTS :Semantic-aware digital twin synchronization over 5G networks. arXiv:۲۰۰۶.۰۳۶۱۷v۱.
۱۳. Wang, W., Tang, L., Liu, T., He, X., Liang, C., & Chen, Q). ۲۰۲۰. (Toward reliability-enhanced, delay-guaranteed dynamic network slicing :A multiagent DQN approach with an action space reduction strategy. IEEE Internet of Things Journal, ۱۱(۶), ۹۲۸۲-۹۲۹۷.
۱۴. Wang, Y., Li, X., & Zhang, J). ۲۰۲۰. (The role of digital twin in 5G-based URLLCs :Current contributions, research challenges, and next directions. IEEE Access.
۱۵. ۳GPP). ۲۰۲۰. (IMT-۲۰۳۰ framework and 5G requirements. ۳GPP TR [23.81](https://www.3gpp.org/ftp/standards/3gpp/IMT-2030/IMT-2030-framework-and-5g-requirements/3gpp-tr-2381).
۱۶. Behnke, I., & Austad, H). ۲۰۲۳. (Real-time performance of industrial IoT communication technologies :A review. IEEE Internet of Things Journal, ۱۱(۵), ۷۳۹۹-۷۴۱۰.
۱۷. Chang, S., Huang, N., Gong, C., & Li, X). ۲۰۲۳. (Low-latency network slicing for VLC-based industrial internet of things :Superframe duration minimization and delay violation probability analysis. IEEE Internet of Things Journal, ۱۰(۱۸), ۱۶۶۱۷-۱۶۶۳۶.

۱۸. Cui, P., Han, S., Xu, X., Zhang, J., Zhang, P., & Ren, S). ۲۰۲۳. (End-to-end delay performance analysis of industrial internet of things :A stochastic network calculus perspective .IEEE Internet of Things Journal, ۱۱)۳(, ۵۳۷۴-۵۳۸۷.
۱۹. Lee, Y., Ha, T., Khreishah, A., Noh, W., & Cho, S). ۲۰۲۳. (Delay-controlled bidirectional traffic setup scheme to enhance the network coding opportunity in real-time industrial IoT networks .IEEE Internet of Things Journal, ۱۰)۱۲(, ۱۰۵۵۹-۱۰۵۷۴.
۲۰. Zhou, X., Yang, Z., Ren, Y., Bai, W., Lo, B., & Yang, E .M). ۲۰۲۴. (Edge intelligence for G₆-enabled industrial internet of things .IEEE Communications Surveys & Tutorials.
۲۱. PREDICT- G₆ Project) .۲۰۲۵. (Enhancements for multi-domain multi-technology deterministic networks .Horizon Europe SNS JU Project.
۲۲. UNITY- G₆ Project) .۲۰۲۵. (Use case ۴ :Open RAN-enabled non-public network for supporting time-sensitive applications for Industry ۴.۰ .UNITY- G₆ Project.
۲۳. ELASTIC Project) .۲۰۲۵. (Demonstrator ۱ :Smart connected factory of the future .ELASTIC Project.
۲۴. G₆-XR Project) .۲۰۲۵. (Meet the awarded open call ۳ projects :Accelerating vertical adoption of G₆-XR technologies .G₆-XR Project.