Scientific-Research Quarterly Journal of Technical Science
Khatam Al-Nabieen University
Volume 2, Issue 4, Autumn 2024

Review: Dynamic Resource Allocation in Edge Networks with a Digital Twin Approach

Hussain Mowahedi[1]

Abstract

Resource allocation in edge networks refers to the process of efficiently distributing computing, storage, and networking resources to meet the diverse needs of applications and services. With the emergence of Digital Twin (DT) technology—which provides virtual counterparts of physical objects—resource allocation in edge networks can be enhanced by leveraging the capabilities of digital twins. Digital twins offer real-time monitoring and analysis of physical assets, enabling a deeper understanding of their behavior and resource requirements. By integrating DT into edge networks, resource allocation can be optimized using insights gained from these virtual replicas. This integration enables dynamic resource allocation based on real-time data from DTs, facilitating predictive management and proactive resource assignment.

This research aims to optimize resource allocation in dynamic and resource-constrained environments. The proposed method combines Deep Reinforcement Learning (DRL) with Digital Twin technology. Results show that this approach leads to reduced latency, improved energy efficiency, and enhanced resource allocation under varying conditions. As a result, integrating DT into edge networks improves resource optimization by providing real-time monitoring, predictive analysis, and intelligent decision-making capabilities.

Keywords: Resource Allocation, Edge Network, Digital Twin, Internet of Things (IoT).

[1] IT Department, Faculty of Computer Science, Khatam Al-Nabieen (PBUH) University – Kabul
Hussain.mowahedi@gmail.com, +93 (0) 748743688

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

فصلنامه علمی - تحقیقی علوم فنی
پوهنتون خاتم‌النبیین(ص)
سال دوم ، شماره‌ی چهارم، خزان ۱۴۰۳
صفحه ۱۱۴ – ۱۲۸

مروری بر تخصیص منابع پویا در شبکه‌های لبه یی با رویکرد دوقلوی دیجیتال

حسین موحدی[۱]

چکیده

تخصیص منابع در شبکه‌های لبه به فرآیندی اطلاق می‌شود که با توزیع کارآمد منابع محاسباتی، ذخیره‌سازی و شبکه‌بندی، نیازهای مختلف برنامه‌ها و خدمات را برآورده می‌سازد. با ظهور فناوری دوقلوی دیجیتال که همتای مجازی اجسام فیزیکی را فراهم می‌کند، تخصیص منابع در شبکه‌های لبه با بهره‌گیری از قابلیت‌های دوقلو دیجیتال بهبود می‌یابد. دوقلوی دیجیتال قابلیت نظارت و تجزیه و تحلیل در زمان واقعی از دارایی‌های فیزیکی را فراهم می‌کند، که بهترین درک از رفتار و نیازهای منابع آن‌ها را ممکن می‌سازد. با یکپارچه‌سازی (DT)[۲] در شبکه‌های لبه، تخصیص منابع می‌تواند با بهره‌گیری از بینش‌های به‌دست آمده از این تکثیرهای مجازی بهینه‌سازی شود. این یکپارچگی، تخصیص منابع پویا بر اساس داده‌های زمان واقعی از DT را ممکن می‌سازد و امکان مدیریت و تخصیص پیش‌بینانه منابع را فراهم می‌کند.

محاسباتی، ذخیره‌سازی و شبکه‌بندی، نیازهای مختلف برنامه‌ها و خدمات را برآورده می‌سازد. با ظهور فناوری دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) که همتای مجازی اجسام فیزیکی را فراهم می‌کند، تخصیص منابع در شبکه‌های لبه با بهره‌گیری از قابلیت‌های این فناوری بهبود می‌یابد. این تحقیق با هدف بهینه‌سازی تخصیص منابع در محیط‌های پویا و محدود به منابع انجام شده است. روش پیشنهادی از ترکیب یادگیری تقویتی عمیق (DRL)[۳] و فناوری دوقلوی دیجیتال بهره می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که این رویکرد منجر به کاهش تأخیر، افزایش بهره‌وری انرژی و بهبود تخصیص منابع در شرایط متغیر می‌شود.

در نتیجه، یکپارچگی DT در شبکه‌های لبه، تخصیص منابع را با فراهم کردن نظارت در زمان واقعی، تجزیه و تحلیل پیش‌بینانه و تصمیم‌گیری هوشمند قابلیت بهینه‌سازی منابع بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تخصیص منابع، شبکه لبه، دوقلوی دیجیال، اینترنت اشیا

[۱] دیپارتمنت تکنالوژی معلوماتی پوهنځی کامپیوتر ساینس، پوهنتون خاتم النبیین (ص) -کابل، افغانستان
Hussain.mowahedi@gmail.com, +93 (0) 748743688

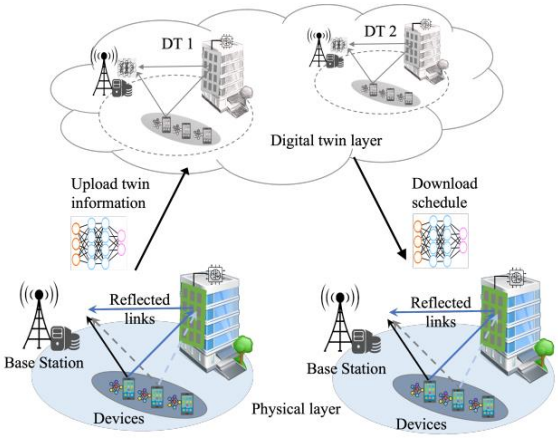
[2] Digital Twin
[3] Deep Reinforcement Learning

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

۱- مقدمه

تخصیص منابع در محاسبات لبه با دوقلو دیجیتال به فرآیند توزیع و مدیریت کارآمد منابع محاسباتی، مانند قدرت پردازش، حافظه و ذخیره‌سازی، در یک محیط محاسبات لبه‌ای که دارای دوقلوهای دیجیتالی است، اشاره دارد، این امکان را به کاربران می‌دهد تا بدون نیاز به سرورها و منابع مرکزی، از منابع محاسباتی متمرکز در نقاط مختلف شبکه استفاده کنند که اشتراک منابع در رایانش لبه باعث بهبود کارایی، کاهش تأخیر و هزینه و افزایش امنیت در برنامه‌ها و خدمات رایانشی می‌شود[۱].

محاسبات لبه یک الگوی محاسباتی غیرمتمرکز است که محاسبات و ذخیره سازی داده ها را به منبع داده یا دستگاه های نقطه پایانی نزدیک می کند، و هدف آن کاهش تأخیر، بهبود پردازش بلادرنگ و حفظ پهنای باند با پردازش داده‌ها به صورت محلی یا در لبه شبکه است، نه ارسال آن به مرکز داده ابری متمرکز. یک مدل معماری است که در آن پردازش داده‌ها و اجرای برنامه‌ها به نزدیکی منابع داده‌ها صورت می‌گیرد، طور خلاصه، رایانش لبه یک رویکرد معماری است که با فراهم کردن قابلیت پردازش و ذخیره سازی داده‌ها در نزدیکی منابع تولیدکننده آن‌ها، امکان بهبود عملکرد، کاهش تاخیر، حفظ حریم خصوصی و امنیت داده‌ها را فراهم می‌کند. DT نیز می‌توانند در بهبود عملکرد و مدیریت منابع در شبکه‌های لبه نقش مهمی ایفا می‌کند. یک دوقلوی دیجیتال یک مدل دیجیتال/مجازی پویا و خودتکامل است که نمایانگر حالت دقیق دوقلوی فیزیکی آن در هر لحظه‌ای است از طریق تبادل داده‌های زمان واقعی و نگهداری داده‌های تاریخی. این دوقلوی دیجیتال نه تنها دوقلوی فیزیکی خود را تقلید می‌کند، بلکه هر تغییری در دوقلوی دیجیتال نیز توسط دوقلوی فیزیکی تقلید می‌شود، که دوقلوی دیجیتال نمایش مجازی یک شیء فیزیکی، سیستم یا فرآیند است. این داده‌های بلادرنگ از حسگرها و سایر منابع را با تکنیک‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی پیشرفته برای ایجاد یک کپی دیجیتال ترکیب می‌کند. دوقلوهای دیجیتال اغلب برای نظارت، تجزیه و تحلیل و بهینه سازی سیستم های فیزیکی استفاده می شوندکه ساختار کلی از دوقلوی دیجیتال در شبکه‌های لبه در شکل۱ ذیل بیان شده است.



شکل ۱: ساختار کلی از دوقلوی دیجیتال درشبکه‌های لبه

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

وقتی این دو مفهوم را با هم ترکیب می‌کنند، محاسبات لبه‌ای را با دوقلو دیجیتال دریافت می‌کنید. در این زمینه، از دوقلوهای دیجیتال برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های فیزیکی استفاده می‌شود و داده‌های تولید شده، توسط دوقلوهای دیجیتال در لبه پردازش می‌شوند. این امکان تجزیه و تحلیل بلادرنگ، تصمیم گیری و کنترل سیستم های فیزیکی را فراهم می کند. تخصیص منابع تعیین نحوه توزیع منابع محاسباتی در زیرساخت محاسبات لبه برای پشتیبانی از نیازهای پردازشی دوقلوهای دیجیتال است. در اینجا برخی از ملاحظات کلیدی وجود دارند:

منابع محاسباتی: تخصیص قدرت پردازش، حافظه و ذخیره‌سازی کافی برای اجرای موثر مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های دوقلوی دیجیتال. این ممکن است شامل متعادل کردن بار باشد تا اطمینان حاصل شود که هیچ گره لبه ای تحت تأثیر قرار نمی گیرد.

مدیریت داده ها: مدیریت کارآمد جریان داده بین سیستم فیزیکی، دستگاه های دیجیتال دوقلو و لبه. این ممکن است شامل فشرده سازی داده ها، فیلتر کردن، یا اولویت بندی برای به حداقل رساندن تأخیر و بهینه سازی استفاده از منابع باشد.

منابع شبکه: اطمینان از اینکه زیرساخت شبکه می تواند ترافیک داده تولید شده توسط دوقلوهای دیجیتال را مدیریت کند و از ارتباطات کم تاخیر بین گره های لبه پشتیبانی کند.

بهره‌وری انرژی: در نظر گرفتن مصرف برق دستگاه های لبه و بهینه سازی تخصیص منابع برای به حداقل رساندن مصرف انرژی در حین برآوردن الزامات عملکرد.

مقیاس پذیری: طراحی زیرساخت محاسبات لبه برای مقیاس پویا بر اساس حجم کاری دوقلوهای دیجیتال و تعداد دستگاه های متصل.

به طور خلاصه، تخصیص منابع در محاسبات لبه با دوقلو دیجیتال یک جنبه حیاتی برای بهینه‌سازی عملکرد و کارایی سیستم‌هایی است، مدل‌سازی و کنترل هم به پردازش داده‌های بلادرنگ در لبه و هم به دوقلوهای دیجیتال متکی هستند. این شامل تعادل دقیق منابع محاسباتی، مدیریت داده ها و قابلیت های شبکه برای برآوردن نیازهای خاص برنامه است[۲].

۲-۱ بیان مسأله

با افزایش سریع تعداد دستگاه‌های اینترنت اشیاء (IoT) [1]هوشمند، شبکه‌های لبه تعداد زیادی وظایف محاسباتی را تولید می‌کنند که نیاز به دستگاه‌های منابع محاسباتی لبه دارند تا محاسبات را انجام دهند. اما تخصیص نامناسب منابع محاسباتی لبه منجر به مصرف بالای انرژی و هدر رفت منابع می‌شود. بنابراین، هنگامی که وظایف کاربر به سیستم محاسبات لبه منتقل می‌شوند، تخصیص منابع منطقی یک مسئله مهم است.

تحقیق در زمینه رایانش لبه با دوقلوی دیجیتال اهمیت بسیاری دارد و انگیزه‌های متعددی برای انجام آن وجود دارد. در زیر به برخی از این انگیزه‌ها و اهمیت‌ها اشاره می‌شود:

[1] Industrial Internet of Things

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

- **بهینه‌سازی استفاده از منابع:** به کمک دوقلوی دیجیتال در شبکه‌های لبه، می‌توان بهبود قابل توجهی در استفاده از منابع شبکه داشت. با استفاده از DT و الگوریتم‌های هوشمند، منابع شبکه را بهینه کرده و به صورت پیش‌بینانه و هوشمند تخصیص داد. این امر بهبود عملکرد شبکه و کاهش هدررفت منابع را به همراه دارد.
- **افزایش سرعت و کاهش تاخیر:** استفاده از رایانش لبه با دوقلوی دیجیتال، تاخیر در انتقال داده‌ها از منبع تولیدکننده به مراکز داده ابری بهبود می‌یابد. این امر برای برنامه‌هایی که نیاز به پاسخ سریع دارند (مانند برنامه‌های واقعیت مجازی و واقعیت افزوده) بسیار مهم است.
- **امنیت و حریم خصوصی داده‌ها:** شبکه‌های لبه، داده‌ها در نزدیکی منابع تولیدکننده آن‌ها پردازش می‌شوند و به مراکز داده ابری ارسال نمی‌شوند. این امر میزان حریم خصوصی و امنیت داده‌ها را افزایش می‌دهد و از خطرات احتمالی ناشی از انتقال داده‌ها بین شبکه‌ها جلوگیری می‌کند.
- **افزایش عملکرد برنامه‌ها:** با اجرای برنامه‌ها در نزدیکی منابع تولیدکننده داده‌ها، میزان عملکرد و پاسخگویی برنامه‌ها بهبود می‌یابد. این امر برای برنامه‌هایی که نیاز به پردازش محاسباتی سنگین دارند (مانند پردازش تصویر یا تشخیص الگو) بسیار مفید است.
- **افزایش قابلیت پیش‌بینانه و تصمیم‌گیری هوشمند:** با استفاده از DT در شبکه‌های لبه، می‌توان به صورت پیش‌بینانه و هوشمند منابع را تخصیص داد و عملکرد شبکه را بهبود بخشید. همتای دیجیتال با تجزیه و تحلیل داده‌ها و ارائه توصیه‌ها، بهبود استراتژی‌های تخصیص منابع را ارائه می‌دهد.

به طور کلی، تحقیق در زمینه رایانش لبه با دوقلوی دیجیتال بهبود عملکرد شبکه، کاهش تاخیر، افزایش امنیت و حریم خصوصی داده‌ها و افزایش قابلیت پیش‌بینانه و تصمیم‌گیری هوشمند را به همراه دارد. این تحقیقات می‌توانند در بهبود عملکرد و مدیریت شبکه‌های لبه نقش مهمی ایفا کنند [۳].

۳- پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، تخصیص منابع در رایانش لبه با استفاده از مدل‌های دوقلوی دیجیتال (DT)مورد توجه قرار گرفته است. این مدل‌ها در بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش تأخیر و تخصیص بهینه منابع در شبکه‌های لبه، به ویژه در مواجهه با حجم بالای داده‌های دستگاه‌های اینترنت اشیاء(IoT) ، موثر بوده‌اند.

۳-۱ تخصیص منابع در رایانش لبه با رویکرد دوقلوی دیجیتال- الگوریتم نهنگ

بهره‌برداری بهینه از منابع محاسباتی در شبکه‌های لبه (Edge) با استفاده از مدل تخمینی تحت عنوان " (DT) به‌کمک مدل تخصیص منابع محاسباتی در شبکه لبه" می‌باشد. با افزایش سریع تعداد دستگاه‌های اینترنت اشیاء (IoT) هوشمند، شبکه‌های لبه تعداد زیادی وظایف محاسباتی را تولید می‌کنند که نیاز به دستگاه‌های منابع محاسباتی لبه دارند تا

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

محاسبات را انجام دهند. اما تخصیص نامناسب منابع محاسباتی لبه منجر به مصرف بالای انرژی و هدر رفت منابع می‌شود. بنابراین، هنگامی که وظایف کاربر به سیستم محاسبات لبه منتقل می‌شوند، تخصیص منابع منطقی یک مسئله مهم است. تخصیص منابع محاسباتی به کمک دیجیتال-توئین (DT) و یک تابع بهینه‌سازی مشترک برای مصرف انرژی، تاخیر و نرخ تخصیص منابع بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ بهبود یافته توسعه داده می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ با بهبودهای اعمال شده، به طور قابل توجهی میزان تخصیص منابع، مقدار تابع هدف تخصیص، مصرف انرژی و نامتوازنی میانگین تخصیص منابع را کاهش می‌دهد. همچنین، مصرف انرژی با کمک دیجیتال توین به ۸۹.۶٪ نسبت به بدون استفاده از آن کاهش می‌یابد [۴]. در آینده، تحقیقات بیشتری به بررسی تأثیر دستگاه‌های کاربران پویا بر مسائل بهینه‌سازی و مطالعه بیشتری درباره تخصیص وظایف فناوری دیجیتال در محیط محاسبات لبه برای کاربران پویا متمرکز خواهد شد.

۳-۲ تخصیص منابع در رایانش لبه با رویکرد دوقلوی دیجیتال- یادگیری عمیق

سیستم محاسبات مبتنی بر لبه تلفن همراه را با خدمات ارتباطی قابل اعتماد و با تاخیر پایین و خدمات تاخیر پذیر در نظر می‌گیریم. هدف ما کمینه کردن مصرف انرژی نرمال شده است، که به عنوان مصرف انرژی برای هر بیت تعریف می‌شود، با بهینه‌سازی انجمن کاربری، تخصیص منابع و احتمال انتقال بار به مقصد مشخص شده توسط مقتضیات کیفیت خدمات است. انجمن کاربری توسط موجودیت مدیریت تلفن همراه (MME) [۱]مدیریت می‌شود، در حالی که تخصیص منابع و احتمالات انتقال بار توسط هر نقطه دسترسی (AP) [۲]تعیین می‌شود. ما یک معماری یادگیری عمیق [۳](DL) پیشنهاد می‌دهیم، که یک دوگانه دیجیتال از محیط شبکه واقعی برای آموزش الگوریتم DL به صورت آفلاین در یک سرور مرکزی استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با بهینه‌سازی تخصیص منابع و احتمال انتقال، الگوریتم با پیچیدگی کم ما می‌تواند بیش از ۸۷٪ از انرژی را نسبت به مدل‌های مقایسه‌ای صرفه‌جویی کند [۵]. در آینده تحقیق بهبود بهره‌وری انرژی [۴](EE) برای خدمات (URLLC) [۵]و خدمات با تاخیر تحمل‌پذیر در سیستم‌هایMEC و شبکه عصبی عمیق (DNN) [۶]را با استفاده از دوگانه دیجیتال آموزش داد زمانی که سیاست بهینه در دسترس نباشد.

۳-۳. تخصیص منابع در رایانش لبه با رویکرد دوقلوی دیجیتال، محیط بی‌سیم

شبکه نسل ششم برای پاسخ به نیازهای پیشرفته‌ای مانند نرخ انتقال داده بالا و اتصال بی‌وقفه طراحی شده است. دستگاه‌های اینترنت اشیاء صنعتی (IIoT) از این شبکه بهره

---

[1] Mobility Management Entity
[2] Access Point
[3] Deep Learning
[4] Energy Efficiency
[5] Ultra-Reliable low-latency
[6] Deep Neural Network

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

می‌برند، اما چالش‌هایی مانند حجم زیاد داده‌ها، تنوع دستگاه‌ها و نگرانی‌های حریم خصوصی وجود دارد. برای حل این مشکلات، شبکه لبه توأم دیجیتال پیشنهاد شده که از ارتباط دستگاه به دستگاه (D2D) برای نزدیک کردن منابع به دستگاه‌ها و استفاده از دوقلوی دیجیتال برای ارتباط بین فضای فیزیکی و مجازی بهره می‌برد. همچنین، از یادگیری تقویت شده برای بهبود تخصیص منابع و حفظ حریم خصوصی استفاده می‌شود.[6]

در این چارچوب، از الگوریتم‌های برنامه‌ریزی منابع دوقلوی دیجیتال استفاده می‌شود که تأخیر و از دست دادن تکرار را به حداقل می‌رساند و با استفاده از تشخیص مدل غیرعادی، عملکرد و امنیت را بهبود می‌دهد. این تحقیق پیشرفت‌های قابل‌توجهی در کاهش تأخیر و بهبود مصرف انرژی ارائه می‌دهد.[7]

دوقلوی دیجیتال بی‌سیم (WDT) شبکه‌های بی‌سیم را با دوقلوهای دیجیتال ترکیب می‌کند تا محاسبات لبه‌ای با تأخیر کم فراهم کند. در این زمینه، از فرآیند تصمیم مارکوف و الگوریتم‌های یادگیری تقویت عمیق برای بهینه‌سازی تداعی لبه و کاهش هزینه‌های سیستم استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این روش‌ها عملکرد بهتری در مقایسه با طرح‌های پایه دارند.[8]

همچنین، روش تخصیص منابع ارتباطی بی‌سیم مبتنی بر QoE پیشنهاد شده که از مدل‌های پویا برای بهبود کیفیت تجربه کاربر (QoE) استفاده می‌کند و به کمک الگوریتم‌های تخصیص منابع از سه مرحله تخمین، تخصیص و تنظیم بازخورد، دسترسی بیشتری به کاربران فراهم می‌کند [۹].

۴-۳. پیش بینی ازدحام ترافیک با رویکرد دوقلوی دیجیتال در شبکه لبه

ترافیک جاده ای با افزایش جمعیت و وسایل نقلیه به طور تصاعدی در حال رشد است. زیرساخت‌های اتصال جاده‌ای رشد مناسبی نداشته است و از این رو تلاش‌های تحقیقاتی برای تخصیص بهینه منابع و استفاده از منابع ارتباطی این روزها زیاد شده است. بنابراین، مدیریت ترافیک در زمان واقعی مبتنی بر بینش، جزء مهمی در ایجاد و حفظ شهرهای هوشمندتر در سراسر جهان است. راه‌حل‌های فناوری اطلاعات و سازمان‌های خدماتی با تعدادی از راه‌حل‌های مدیریت ترافیک خودکار ارائه شده‌اند و مشکل اصلی آنها متأسفانه واکنش‌پذیر هستند و از این رو راه‌حلی ناکارآمد برای محیط‌های شهری که به طور فزاینده متصل و پویا هستند. بنابراین، رونمایی از راه‌حل‌های نظارت، اندازه‌گیری، مدیریت و بهبود ترافیک به‌هنگام، تطبیقی، دقیق‌محور و پیش‌بینی‌کننده ترافیک به‌عنوان یک نیاز ضروری برای شهرهای پایدار مورد تاکید است. ما با یک رویکرد جدید با استفاده از چند فناوری و ابزار بالقوه و امیدوارکننده مانند یک مدل مجازی قابل اعتماد و قابل استفاده مجدد برای وسایل نقلیه، یک مدل یادگیری ماشینی و مدل سازی دوقلوی دیجیتال را ارایه می‌کند. از یک رویکرد دیجیتالی که از چهار جزء اصلی تشکیل شده است: (۱) یک مدل وسیله نقلیه مجازی (VV) که نشان دهنده وسیله نقلیه فیزیکی و رفتار راننده آن است، (۲) یک مدل یادگیری ماشینی که راننده را پیش بینی می کند. قصد مبتنی بر مدل VV و داده‌های ترافیک بلادرنگ، (۳) مه اینترنت اشیا یا تجزیه و تحلیل داده‌های لبه که داده‌های مدل VV

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

و مدل یادگیری ماشین را پردازش می‌کند، و (۴) یک دریاچه داده مبتنی بر ابر که ذخیره می‌کند. رویکرد پیشنهادی از نظر کاهش زمان سفر، زمان سرویس و مصرف سوخت بهتر شده است. تحقیقات آینده که پیشنهاد می‌شود مانند بهبود دقت و قابلیت اطمینان مدل VV و مدل یادگیری ماشین در بستر دوقلوی دیجیتال به درنظر گرفتن رسانه‌های اجتماعی و داده‌های آب و هوا که تاثیر مستقیم بالای عمکرد دارند [۱۰].

۳-۵ تخصیص منابع تطبیقی با استفاده از دوقلو دیجیتال و پیش‌بینی احتمالی بار خورشیدی و قیمت‌های بازار

بهینه‌سازی عملکرد یک نیروگاه حرارتی خورشیدی با استفاده از دوقلو دیجیتال و پیش‌بینی احتمالی بار خورشیدی و قیمت‌های بازار ارائه می‌کند. دوقلو دیجیتال و یک مدل پیش‌بینی احتمالی را با استفاده از رگرسیون فرآیندهای گاوسی (GPR) و جنگل‌های رگرسیون کمی (QRF) برای پیش‌بینی بار خورشیدی و قیمت‌های بازار برای افق‌های زمانی مختلف و فواصل اطمینان ایجاد کردند، آنها سپس یک مسئله بهینه سازی را فرموله کردند که با در نظر گرفتن مبادله بین درآمد و هزینه، RRA بهینه را برای هر سناریوی پیش بینی شده تعیین می کند. RRA شامل مقدار ذخیره انرژی حرارتی (TES)، سوخت کمکی و اتصال به شبکه برق است. که در نتیجه مصرف سوخت و سطوح مختلف عدم قطعیت و تنوع در پیش‌بینی ها قوی بین آنها را بدست آورند. بعضی از ضعف هایکه میتوان درینجا وارد است فرض اطلاعات و ارتباط کامل بین دوقلو دیجیتال و گیاه واقعی که ممکن است در عمل واقع بینانه نباشد، نادیده گرفتن محدودیت های عملیاتی و عدم قطعیت در دوقلو دیجیتال، مانند تعمیر و نگهداری، خرابی ها، یا خطاهای انسانی. استفاده از داده های تاریخی برای آموزش و آزمایش مدل های پیش بینی، که ممکن است منعکس کننده تغییرات آینده در الگوهای آب و هوا یا شرایط بازار نباشد. در تحقیقات آینده می‌توان گنجاندن محدودیت ها و عدم قطعیت های عملیاتی در دوقلو دیجیتال و مسئله بهینه سازی و توسعه مدل های پیش بینی تطبیقی که می توانند پارامترها و ساختار خود را بر اساس داده ها یا بازخوردهای جدید به روز کنند [۱۱].

۳-۶. تخصیص منابع رایانش لبه با رویکرد دوقلوی دیجیتال به کمک پهپاد

شبکه تلفن همراه با کمک پهپاد با یک استراتژی تخصیص منابع پویا با قدرت دوگانه دیجیتال مبتنی بر آموزش آنلاین و یادگیری تقویتی را پیشنهاد می‌کند. هدف این پیشنهاد بهبود عملکرد شبکه در محیط‌های پر تراکم و پرترافیک و برآورده کردن الزامات تخصیص منابع مختلف برای انواع گره های مختلف. مدل سیستم، فرمول بندی مسئله و رویکرد راه حل پیشنهاد را ارائه می کند. مدل سیستم شامل یک شبکه تلفن همراه به کمک پهپاد با انواع گره های مختلف مانند کاربران زمینی، کاربران هوایی و پهپادها است. طراحی این مدل برای حداکثر رساندن ابزار شبکه با بهینه سازی تصمیمات تخصیص منابع برای هر نوع گره است. رویکرد راه‌حل، استفاده از یک چارچوب یادگیری چند وظیفه‌ای با قدرت دوگانه دیجیتال برای یادگیری همزمان سیاست‌های تخصیص منابع برای انواع گره‌های مختلف، و مکانیزم یادگیری تقویتی مبتنی بر شبکه عمیق Q برای اجرای تصمیمات تخصیص منابع بر اساس پاداش‌های ارزیابی‌شده می‌باشد. که این پیشنهاد از نظر ابزار شبکه، QoS کاربر، سربار

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

ارتباط و سرعت همگرایی به پیشرفت های قابل توجهی دست یافته است. برخی از چالش ها و محدودیت های پیشنهادی مانند مقیاس پذیری، امنیت و استحکام شبکه تلفن همراه با کمک پهپاد، دقت و کارایی فناوری دوقلو دیجیتال و پیچیدگی و پایداری است که می‌توان گسترش مدل سیستم برای شامل انواع گره ها و سناریوهای بیشتر، تقویت فناوری دوقلو دیجیتال با ویژگی ها و عملکردهای بیشتر، و استفاده از تکنیک های یادگیری تقویتی پیشرفته تر برای بهبود منبع عملکرد مناسب خواهد بود [۱۲].

تخصیص منابع برای شبکه‌های اینترنت وسایل نقلیه (IoV) که از فناوری دوقلوی دیجیتال (DT) و وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV) برای بهبود عملکرد و کارایی شبکه استفاده می‌کند. یک الگوریتم مبتنی بر یادگیری تقویت عمیق (DRL) به نام RADiT ارائه می‌کند که استراتژی تخلیه کار را برای کارهای حساس به تاخیر بهینه می‌کند. هدف آن به حداکثر رساندن ابزار شبکه و در عین حال به حداقل رساندن تأخیر و مصرف انرژی است. این الگوریتم با یادگیری سیاست تخلیه وظایف بهینه برای هر وسیله نقلیه به صورت آنلاین، مشکل را حل می‌کند. روش اجرای محلی، روش اجرای ابری و روش تخلیه تصادفی. این نشان می دهد که روش و الگوریتم پیشنهادی می تواند به سودمندی بالاتر، تاخیر کمتر و بازده انرژی بالاتر نسبت به روش های پایه دست یابد. همچنین نشان می‌دهد که روش و الگوریتم پیشنهادی می‌تواند با سناریوهای مختلف شبکه و شرایط ترافیک سازگار شود. برای تحقیق آینده جهت بهبود دقت مدل‌سازی و هماهنگ‌سازی DT، افزایش قابلیت اطمینان و امنیت ارتباطات پهپاد، و بررسی تکنیک‌ها و یادگیری عمیق به کاربرد [۱۳].

۳-۷. تخصیص منابع رایانش لبه با رویکرد دوقلوی دیجیتال به کمک خودرو

اینترنت وسایل نقلیه (IoV) یک پارادایم امیدوارکننده برای ارائه خدمات مختلف برای کاربران وسایل نقلیه مانند رانندگی مستقل، مدیریت ترافیک و سرگرمی است. با این حال، IoV همچنین با چالش‌هایی مانند تأخیر بالای پاسخ شبکه، محدودیت منابع ارتباطی و محاسباتی و توپولوژی شبکه پویا مواجه است. یک طرح همکاری هوشمند لبه پشتیبان دیجیتال دوقلو (DT) را پیشنهاد می‌کنند که هدف آن به حداقل رساندن تأخیر پاسخ شبکه برای برنامه‌های حساس به تأخیر در IoV است. مدل سیستم، فرمول‌بندی مسئله و رویکرد راه‌حل طرح را ارائه می‌کند. مدل سیستم شامل یک شبکه IoV به کمک DT است که شامل کاربران خودرو، سرورهای لبه و یک سرور ابری است. کاربران وسیله نقلیه دستگاه های تلفن همراهی هستند که داده تولید می کنند و از سرورهای لبه یا سرور ابری درخواست خدمات می کنند. سرورهای لبه گره های محاسباتی توزیع شده ای هستند که خدمات با تاخیر کم را برای برنامه های IoV ارائه می دهند. در آینده امکان تحقیق در باره گسترش شبکه IoV به کمک DT برای شامل انواع بیشتری از کاربران خودرو و سرورهای لبه، بهبود الگوریتم DDPG با تکنیک‌های یادگیری پیشرفته‌تر وجود دارند [۱۴].

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که استفاده از دوقلوی دیجیتال در رایانش لبه منجر به بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش تأخیر و بهینه‌سازی تخصیص منابع می‌شود .چالش‌های موجود شامل مواردی نظیر دقت پایین، امنیت، مقیاس‌پذیری و هماهنگی کاربران پویا است.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

در تحقیقات آینده، ادغام فناوری‌های نوین یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای بهبود عملکرد پیشنهاد شده است.

۴- روش تحقیق

یادگیری تقویتی عمیق (DRL)[1] همراه با دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) به عنوان یک رویکرد پیشرفته در بهینه‌سازی انتقال وظایف و تخصیص منابع در محاسبات لبه‌ای موبایل (MEC)شناخته می‌شود، دوقلوی دیجیتال با شبیه‌سازی دقیق و بلادرنگ از سیستم واقعی، محیطی برای آموزش و بهبود استراتژی‌های DRL فراهم می‌کند. یادگیری عمین در این رویکرد از الگوریتم‌هایی مانند شبکه عمیق (DQN) Q و شبکه عمیق Q دوئلی (DDQN) برای کاهش تأخیر، افزایش بهره‌وری انرژی و بهبود زمان تکمیل وظایف استفاده می‌کند. این روش‌ها با شبیه‌سازی شرایط پویا، تصمیمات بهینه‌ای برای انتخاب سرورهای لبه‌ای یا ابری اتخاذ می‌کنند[۱۵].

علاوه بر این، چارچوب‌های DRL چندعامله با همکاری دوقلوی دیجیتال، تخصیص منابع و مهاجرت وظایف را به صورت توزیع‌شده مدیریت می‌کنند. همچنین، استفاده از نظریه بازی‌ها در این چارچوب‌ها باعث بهبود زمان‌بندی و تخصیص منابع در کاربردهای صنعتی می‌شود. دوقلوی دیجیتال با تقویت تکنیک‌های مبتنی بر آگاهی از زمینه (Context-Aware) و کیفیت خدمات (QoS-Aware)، بهره‌وری منابع را با توجه به نیازهای برنامه‌ها و شرایط عملیاتی افزایش می‌دهد. این رویکرد نوین، راهکاری مؤثر برای غلبه بر چالش‌های محیط‌های پویا و محدود به منابع در MEC ارائه می‌دهد[۱۶، ۱۷].

این تحقیق از چارچوب‌های DRL همراه با دوقلوی دیجیتال برای تخصیص منابع در شبکه‌های لبه استفاده کرده است. مراحل روش تحقیق به شرح زیر است:

- **ایجاد مدل دوقلوی دیجیتال:** دوقلوهای دیجیتال با جمع‌آوری داده‌های زمان واقعی از شبکه‌های لبه ایجاد شده و به صورت مستمر به‌روزرسانی می‌شوند.
- **مدل‌سازی و نظارت:** منابع محاسباتی مانند قدرت پردازش، پهنای باند و ظرفیت ذخیره‌سازی مدل‌سازی شده و عملکرد آن‌ها تحت نظارت است.
- **بهینه‌سازی تخصیص منابع:** با استفاده از الگوریتم‌های DRL مانند شبکه عمیق Q (Deep Q-Network - DQN)، تخصیص منابع به صورت پیش‌بینانه انجام می‌شود.
- **استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی:** برای تحلیل و ارزیابی نتایج، از فریم‌ورک‌های پایتورچ (PyTorch) و شبیه‌سازی شبکه‌های لبه بهره گرفته شده است. داده‌ها از منابع معتبر مانند Internet Topology Zoo گردآوری شده‌اند. این روش تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب دوقلوی دیجیتال و DRL باعث بهبود تخصیص منابع و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه‌های لبه در شرایط متغیر می‌شود.

ترکیب یادگیری تقویتی عمیق و دوقلوی دیجیتال به عنوان یک راهکار نوین در محاسبات لبه‌ای، امکان بهینه‌سازی انتقال وظایف و تخصیص منابع را در محیط‌های پویا و

[1] Deep Reinforcement learning

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

محدود به منابع فراهم می‌کند. این رویکرد نه تنها باعث کاهش تأخیر و مصرف انرژی می‌شود، بلکه با ارائه یک محیط شبیه‌سازی دقیق، فرآیند تصمیم‌گیری را بهبود داده و پایداری سیستم را در شرایط مختلف تضمین می‌کند. این تکنیک‌ها زمینه‌ساز تحولی بزرگ در توسعه سیستم‌های پیشرفته لبه‌ای برای کاربردهای صنعتی و اینترنت اشیاء هستند [۱۸].

۱-۴- مزایا

روش تحقیق متذکره چندین مزیت را ارائه می دهد، از جمله:

۱) **افزایش کارایی:** از آنجایی که دوقلوهای دیجیتال محیط فیزیکی را منعکس می‌کنند، داده‌های بی‌درنگ و دقیقی در مورد در دسترس بودن و استفاده از منابع ارائه می‌کنند. این امکان تخصیص بیشتر منابع، به حداقل رساندن و به حداکثر رساندن بهره وری در شبکه های لبه را فراهم می کند.

۲) **نظارت و تصمیم گیری در زمان واقعی:** با دوقلوهای دیجیتال، تخصیص منابع را می توان در زمان واقعی نظارت و مدیریت کرد. این سیستم به طور مداوم مدل دوقلوی دیجیتال را بر اساس داده های دریافتی از حسگرها و دستگاه های موجود در شبکه لبه به روز می کند. این امکان شناسایی سریع تنگناها یا استفاده ناکافی از منابع را فراهم می کند و تصمیم گیری سریع برای بهینه سازی تخصیص منابع را ممکن می سازد.

۳) **تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده:** دوقلوهای دیجیتال می‌توانند از داده‌های تاریخی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تقاضاها و الگوهای منابع استفاده کنند. با تجزیه و تحلیل مصرف منابع گذشته و رفتار کاربر، روش تحقیقمی تواند نیازهای آینده را به دقت پیش بینی کند. این امر امکان تخصیص و برنامه ریزی پیشگیرانه منابع، تضمین استفاده بهینه و جلوگیری از کمبود منابع بالقوه یا تامین بیش از حد را فراهم می کند.

۴) **انعطاف پذیری و سازگاری:** فناوری دوقلوی دیجیتالی مورد استفاده در این روش ، چارچوب تخصیص منابع منعطف و سازگار را فراهم می کند. از طریق نظارت و تجزیه و تحلیل مستمر، سیستم می تواند به صورت پویا تخصیص منابع را بر اساس شرایط متغیر یا نیازهای کاربر تنظیم کند. این شبکه‌های لبه را قادر می‌سازد تا به سرعت به تغییرات تقاضای منابع پاسخ دهند و از استفاده کارآمد بدون به خطر انداختن عملکرد یا کیفیت خدمات اطمینان حاصل کنند.

۵) **بهینه سازی هزینه:** تخصیص کارآمد منابع منجر به بهینه سازی هزینه در شبکه های لبه می شود. با استفاده از فناوری دوقلو دیجیتال، سازمان ها می توانند تخصیص منابع غیر ضروری را شناسایی و حذف کنند و هزینه های عملیاتی را کاهش دهند. قابلیت تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده دوقلوهای دیجیتال همچنین به برنامه‌ریزی بلندمدت کمک می‌کند و به سازمان‌ها اجازه می‌دهد تا در منابعی که نیاز هستند سرمایه‌گذاری کنند.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

به طور خلاصه، مزایای روش تحقیق جهت بهبود تخصیص منابع در شبکه‌های لبه با استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال شامل افزایش کارایی، نظارت و تصمیم‌گیری در زمان واقعی، تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده، انعطاف‌پذیری و سازگاری، بهینه‌سازی هزینه، و بهبود قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری است. این مزایا به دستیابی به استفاده بهینه از منابع، بهبود عملکرد شبکه و ارائه خدمات با کیفیت بالا در شبکه های لبه کمک می کند[۱۹]، [۲۰].

۲-۴- چالش ها

این روش ممکن است با چالش‌های متعددی روبرو باشد. برخی از این چالش ها عبارتند از:

۱) **دقت و قابلیت اطمینان داده ها:** دوقلوهای دیجیتال برای ارائه تخصیص موثر منابع به داده های دقیق و در زمان واقعی متکی هستند. با این حال، به دست آوردن داده‌های دقیق از دستگاه‌ها و حسگرهای مختلف لبه می‌تواند به دلیل تأخیر شبکه، از دست رفتن بسته‌ها و خرابی دستگاه چالش‌برانگیز باشد.

۲) **مقیاس پذیری:** شبکه های لبه معمولاً از تعداد زیادی دستگاه و گره به هم پیوسته تشکیل شده اند. برای تخصیص موثر منابع، این روش باید بتواند نیازهای مقیاس پذیری شبکه های لبه را مدیریت کند. این روش باید بتواند تعداد زیادی از دوقلوهای دیجیتالی را که دستگاه‌های لبه‌ای مختلف را نشان می‌دهند مدیریت کند و تخصیص کارآمد منابع را در سراسر شبکه تسهیل کند.

۳) **شرایط شبکه پویا:** شبکه های لبه بسیار پویا هستند و دستگاه ها به شبکه می پیوندند و از آن خارج می شوند و شرایط شبکه در طول زمان تغییر می کند. روش تحقیقباید با این شرایط پویا در زمان واقعی سازگار شود تا تخصیص بهینه منابع را تضمین کند. برای حفظ تخصیص کارآمد منابع، باید قادر به رسیدگی به خرابی‌های شبکه، تغییرات در دسترس بودن دستگاه، و نیازهای مختلف منابع باشد.

۴) **حریم خصوصی و امنیت:** شبکه های لبه با داده های حساس از منابع مختلف سروکار دارند. روش متذکره باید به نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی و امنیتی رسیدگی کند تا اطمینان حاصل شود که فرآیند تخصیص منابع، محرمانه بودن، یکپارچگی و در دسترس بودن داده‌ها را به خطر نمی‌اندازد. این باید شامل اقداماتی برای محافظت از داده ها در هنگام انتقال و ذخیره سازی، احراز هویت دستگاه ها و جلوگیری از دسترسی یا دستکاری غیرمجاز داده ها باشد.

۵) **پیچیدگی محاسباتی:** تخصیص منابع در شبکه های لبه شامل مسائل بهینه سازی پیچیده، از جمله پردازش بلادرنگ داده، تصمیم گیری و تخصیص منابع است. روش تحقیقباید قابلیت محاسباتی را داشته باشد تا محاسبات پیچیده و الگوریتم‌های بهینه‌سازی را به طور موثر در محدودیت‌های منابع محاسباتی محدود دستگاه‌های لبه انجام دهد.

پرداختن به این چالش‌ها برای اجرای موفقیت‌آمیز و کاربرد عملی روش تحقیق برای تخصیص منابع در شبکه‌های لبه با استفاده از یک رویکرد دوقلوی دیجیتال بسیار مهم خواهد بود[۲۱]، [۲۲].

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

۵- نتیجه گیری و تحقیق آینده

هدف نهایی این تحقیق، بررسی بهینه‌سازی تخصیص منابع در شبکه‌های لبه با استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال است. این تحقیق به دنبال بهبود کارایی، قابلیت اطمینان و عملکرد کلی شبکه‌های لبه از طریق تخصیص و مدیریت پویا منابعی مانند توان محاسباتی، ظرفیت ذخیره‌سازی و پهنای باند شبکه است. این فرآیند بر اساس تحلیل‌های بی‌درنگ و پایش مستمر وضعیت شبکه که از طریق نمایش‌های دیجیتالی دوگانه زیرساخت‌های شبکه انجام می‌شود، صورت می‌گیرد. با دستیابی به تخصیص مؤثر منابع، این رویکرد هدف نهایی خود را در بهبود تجربه کاربر، کاهش تأخیر و اطمینان از عملکرد بی‌وقفه و بدون درز شبکه‌های لبه دنبال دارد.

در این راستا، استفاده از ترکیب یادگیری تقویتی عمیق (DRL) و دوقلوی دیجیتال به عنوان یک راهکار پیشرفته برای بهینه‌سازی انتقال وظایف و تخصیص منابع در محاسبات لبه‌ای موبایل (MEC) مورد توجه قرار گرفته است. دوقلوی دیجیتال با شبیه‌سازی دقیق شرایط واقعی، امکان آموزش و اجرای استراتژی‌های بهینه DRL را در محیط‌های پویا و پیچیده فراهم می‌آورد. این رویکرد با کاهش تأخیر، افزایش بهره‌وری انرژی و مدیریت بهینه منابع، عملکرد سیستم‌های لبه‌ای را بهبود می‌بخشد.

استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر آگاهی از زمینه (Context-Aware) و کیفیت خدمات (QoS-Aware)نیز در این تحقیق نشان می‌دهد که تخصیص منابع با در نظر گرفتن نیازهای خاص برنامه‌ها و شرایط محیطی به طور قابل توجهی بهره‌وری سیستم‌ها را افزایش می‌دهد.

در این تحقیق، ترکیب DRL و دوقلوی دیجیتال به عنوان یک راه‌حل هوشمند و کارآمد برای بهینه‌سازی تخصیص منابع در شبکه‌های لبه پیشنهاد شده است. با این حال، چالش‌هایی همچون نیاز به نرمال‌سازی داده‌ها، انعطاف‌پذیری در مواجهه با شرایط متغیر شبکه، و مدیریت منابع با در نظر گرفتن محدودیت‌های محیطی و امنیتی مطرح است. تحقیقات آتی می‌تواند به بررسی تکنیک‌های جدید نرمال‌سازی، مدیریت پویای منابع و افزایش استحکام مدل‌های DRL بپردازد.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

۶- مراجع

[1] Grieves, M. Origins of the Digital Twin Concept. 2016. Available online: https://www.researchgate.net/publication/307509727_ Origins_of_the_Digital_Twin_Concept. (Accessed on 25 September 2020).

[2] Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E.P., Qiao, Y., Murray, N. and Devine, D., 2021. Digital twin: Origin to future. Applied System Innovation.

[3] Tang, F., Chen, X., Rodrigues, T.K., Zhao, M. and Kato, N., 2022. Survey on digital twin edge networks (DITEN) toward 6G. Qiu, S., Zhao, J., Lv, Y., Dai, J., Chen, F., Wang, Y. and Li, A., 2022

[4] Qiu, S., Zhao, J., Lv, Y., Dai, J., Chen, F., Wang, Y., & Li, A. (2022). Digital-Twin-Assisted Edge-Computing Resource Allocation Based on the Whale Optimization Algorithm. Sensors, 22(23). https://doi.org/10.3390/s22239546.

[5] Dong, R., She, C., Hardjawana, W., Li, Y., & Vucetic, B. (2019). Deep Learning for Hybrid 5G Services in Mobile Edge Computing Systems: Learn from a Digital Twin. IEEE Transactions on Wireless Communications, 18(10), 4692–4707. https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2927312.

[6] Guo, Q., Tang, F., & Kato, N. (2023). Federated Reinforcement Learning-Based Resource Allocation for D2D-Aided Digital Twin Edge Networks in 6G Industrial IoT. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 19(5), 7228–7236. https://doi.org/10.1109/TII.2022.3227655.

[7] Zhou, Z., Jia, Z., Liao, H., Lu, W., Mumtaz, S., Guizani, M., & Tariq, M. (2022). Secure and Latency-Aware Digital Twin Assisted Resource Scheduling for 5G Edge Computing Empowered Distribution Grids. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 18(7), 4933–4943. https://doi.org/10.1109/TII.2021.3137349.

[8] Kumar, S. A. P., Madhumathi, R., Chelliah, P. R., Tao, L., & Wang, S. (2018). A novel digital twin-centric approach for driver intention prediction and traffic congestion avoidance. Journal of Reliable Intelligent Environments, 4(4), 199–209. https://doi.org/10.1007/s40860-018-0069-y.

[9] Yao, C., Wang, J., Sun, H., Chu, H., Jin, T., & Xiang, Q. (2023). A Data-driven method for adaptive resource requirement allocation via probabilistic solar load and market forecasting utilizing digital twin. Solar Energy, 250, 368–376. https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.005.

[10] Guo, Q., Tang, F., & Kato, N. (2023). Resource Allocation for Aerial Assisted Digital Twin Edge Mobile Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communication. https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3310065.

[11] Lu, Y., Maharjan, S., & Zhang, Y. (2021). Adaptive Edge Association for Wireless Digital Twin Networks in 6G. IEEE Internet of Things Journal, 8(22), 16219–16230. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3098508.

[12] Zhao, J., Chen, Y., & Huang, Y. (2023). QoE-Driven Wireless Communication Resource Allocation Based on Digital Twin Edge Network. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 1–1. https://doi.org/10.1109/jrfid.2023.3317184.

[13] T. Liu et al., "Resource Allocation in DT-Assisted Internet of Vehicles via Edge Intelligent Cooperation," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 18, pp. 17608-17626, 15 Sept.15, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3156100.

[14] Hazarika, B., Singh, K., Li, C. P., Schmeink, A., & Tsang, K. F. (2023). RADiT: Resource Allocation in Digital Twin-Driven UAV-aided Internet of Vehicle Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3310048.

[15] Zhang, Y., Zhang, H., Liu, X., Zhao, C., & Xu, F. (2023). Digital twin-enabled deep reinforcement learning for joint scheduling of ultra-reliable low latency communication and enhanced mobile broad band: A reliability-

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]

guaranteed approach. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 34(3). https://doi.org/10.1002/ett.4705.

[16] Zhang, Y., Liang, W., Xu, W., Xu, Z., & Jia, X. (2024). Cost Minimization of Digital Twin Placements in Mobile Edge Computing. ACM Transactions on Sensor Networks, 20(3). https://doi.org/10.1145/3658449.

[17] Li, J., Guo, S., Liang, W., Wang, J., Chen, Q., Xu, W., Wei, K., & Jia, X. (2024). Mobility-Aware Utility Maximization in Digital Twin-Enabled Serverless Edge Computing. IEEE Transactions on Computers, 73(7), 1837–1851. https://doi.org/10.1109/TC.2024.3388897.

[18] Wang, Y., Fang, J., Cheng, Y., She, H., Guo, Y., & Zheng, G. (2024). Cooperative End-Edge-Cloud Computing and Resource Allocation for Digital Twin Enabled 6G Industrial IoT. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 18(1), 124–137. https://doi.org/10.1109/JSTSP.2023.3345154.

[19] Mu, W., Chen, W., Zhou, H., Liu, N., Shi, H., & Li, J. (2024). Using digital twin to enhance Sim2real transfer for reinforcement learning in 3C assembly. Industrial Robot: the international journal of robotics research and application, 51(1), 125-133.

[20] Ukko, J., Saunila, M., Nasiri, M., Rantala, T., & Holopainen, M. Digital twins' impact on organizational control. Perspectives on formal vs social control, 253-72.

[21] Madubuike, O. C., Anumba, C. J., & Agapaki, E. (2023). Scenarios for digital twin deployment in healthcare facilities management. Journal of Facilities Management, (ahead-of-print).

[22] Hu, W., Zhang, T., Deng, X., Liu, Z., & Tan, J. (2021). Digital twin: A state-of-the-art review of its enabling technologies, applications and challenges. Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment, 2(1), 1-34.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2026-07-12]