



Providing a resource scheduling method in the new generation of wireless local area networks

Azadeh Pirhayati¹, Reza Mohammadi^{*2}, Mohammad Nasiri³

¹ PhD Student, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

² Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

³ Associate Professor, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 20.08.2024

Revised: 18.09.2024

Accepted: 09.12.2024

Keyword:

IEEE 802.11ax standard

OFDMA mechanism

Wireless LANs

Scheduling

WiFi6

***Corresponding Author:**

Reza Mohammadi

Email: r.mohammadi@basu.ac.ir

ABSTRACT

Due to the rapid growth of communication technologies and services, it is expected that in the coming years, billions of devices will be connected through the internet and wireless networks, resulting in a significant amount of traffic being sent and received between them. The sixth-generation standard for wireless networks, known as IEEE 802.11ax or Wi-Fi 6, is designed explicitly for dense environments. One of the primary challenges in 6G wireless networks is resource management in densely populated environments. The increased number of stations and the need for more speed and efficiency have created new challenges in resource scheduling. Among these challenges, we can mention the increase in bandwidth demand, frequency interference, resource limitations, resource scheduling, energy consumption, delay, and maintaining user security. Our goal is to present a resource scheduling method that improves the efficiency and productivity of wireless networks in dense and heterogeneous environments, utilizing the entire bandwidth space. In this research, a method for resource scheduling at the access point based on the Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) mechanism is proposed. This method has been evaluated using the ns-3 network simulator. The results show the proposed scheduler's better performance in terms of throughput, end-to-end delay, and Head-of-Line delay. As a result, the proposed method can help improve the quality of users' experience in dense and heterogeneous environments.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The main goal of future wireless networks is to improve the quality of user experience in dense heterogeneous networks. One of the main needs of operators and sellers is to provide more capacity, less delay, higher efficiency, reliability, and connection of a large number of devices. In dense environments such as stadiums, colleges, residential complexes, and chain stores, there are hundreds of access points and stations. One of the main advantages that wireless local area networks (WLANs) offer is the uncontrolled use of access points. This advantage sometimes causes challenges in the performance of wireless local area networks. The most important inherent challenge is the high and unchecked interference level that exists in the channel access method of wireless networks. The IEEE 802.11ax wireless network standard was introduced to connect users in dense deployments. This standard does not introduce a specific scheduling mechanism. A feature of this standard is the introduction of the OFDMA mechanism, which can be used in the media access control (MAC) layer. The use of OFDMA provides the possibility of scheduling download and upload data flows, and the efficiency of OFDMA depends to a large extent on the scheduling of resources between users. In this article, a new scheduling method is proposed. In the proposed method, the OFDMA mechanism was used to schedule the resources at the access point so that most stations can use the bandwidth for transmission. In practice, the proposed method was compared with two other scheduling methods by implementing several different scenarios and using an ns-3 network simulator.

Methodology

Scheduling is used to allocate resources in the IEEE 802.11ax wireless network standard. When multi-user OFDMA is used, the access point must determine how to allocate the available bandwidth and provide this allocation in a scheduled manner. In other words, with scheduling, we determine the number and size of resource units (RUs) into which the full bandwidth should be divided. In the proposed method, to allocate RUs, the stations that had data to transmit were placed in a queue and when a new TXOP was available, the stations were served in the order of being placed in the queue. In this method, the RUs were arranged in such a way that they can serve the maximum number of stations with the maximum use of bandwidth. The operation and allocation of data sources in the proposed method for 20 MHz bandwidth are shown in Table 1.

Table 1. How to allocate RUs in the proposed method for 20 MHz bandwidth.

Number of stations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>9
Allocation of same-size RU	1*242- tones	2*106- tones	2*106- tones	4*52- tones	4*52- tones	3*52- tones	2*52- tones	1*52- tones	9*26- tones	9*26- tones
other RU allocations	-	-	1*26- tones	-	1*26- tones	3*26- tones	5*26- tones	7*26- tones	-	-

The proposed method was compared with two scheduling functions: 'bw' and 'hol'. In the 'bw' scheduling function, the stations are served in a round-robin manner and allocated the entire bandwidth. The 'hol' scheduling function tries to fit the maximum possible number of stations into a TXOP. Both functions assume that the bandwidth can only be divided into RUs of the same size.

Results and Discussion

Figure 1 shows the total throughput for uploads for the three schedulers described in the multi-user transmission. For all three scheduling methods, the throughput in the number of stations between 1 and 9 is close to each other, and the observed difference is due to the difference in the allocation method. However, with the increase in the number of stations in dense environments, the 'proposed' scheduler and the 'hol' scheduler provided more and closer to each other throughput compared to 'bw'.

Figure 2 shows the end-to-end delay graph for download and upload traffic. The result of the delay of the proposed method was reduced in general, because in this method, the goal is not to wait for any station. Because the 'bw' method uses the entire bandwidth for minimum stations, it keeps more stations waiting and thus creates a greater delay. However, the other two methods cause less delay because they serve the maximum number of stations.

Figure 3 shows the average head-of-line (HoL) delay, which represents the average time interval between two consecutive transmissions to a station. The 'bw' scheduler produced a longer average time between consecutive retransmissions to a station, while the 'hol' scheduler produced a shorter average time between consecutive retransmissions to a station, but the proposed scheduler produced a lower average delay than the other two schedulers.

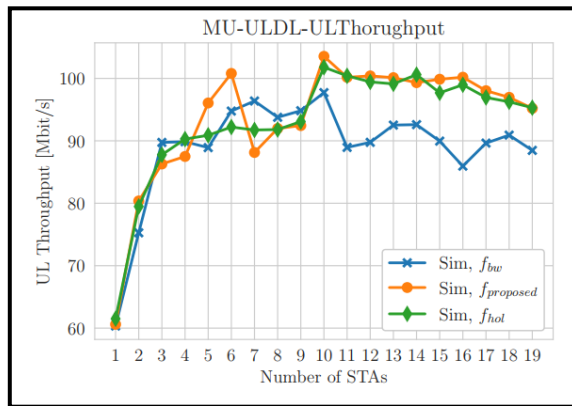


Figure 1. Total throughput of uploads for different numbers of stations.

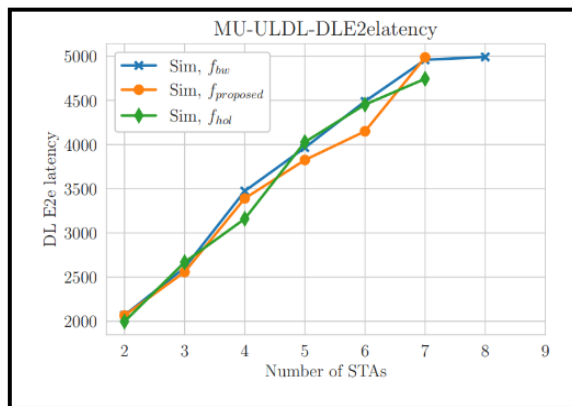


Figure 2. End-to-end delay for download and upload traffic.

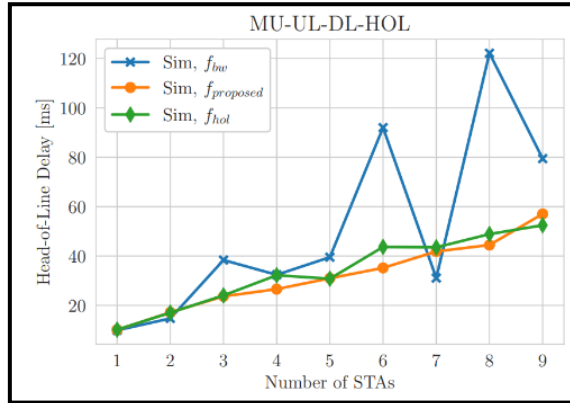


Figure 3. HoL delay for different numbers of stations.

Conclusions

The continuous growth of various services and applications, along with the expansion of smartphones, leads to the evolution of existing wireless networks towards more advanced systems to meet users' needs. The next generation of wireless LANs is WiFi6, whose features are defined by the IEEE 802.11ax standard. This article, focusing on the OFDMA mechanism in the IEEE 802.11ax standard, proposes a new scheduling method at the access point. The criteria of throughput, end-to-end delay, and head-of-line delay were compared, and the results of these criteria showed that the proposed method functions better than the compared methods.

In future research, the type of scheduling can be changed based on different parameters of the network and considering the competition between stations. To improve the performance, different methods of allocating resource units can be checked, and the best allocation mode can be obtained with heuristic or meta-heuristic algorithms.



کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت

بهار ۱۴۰۴، دوره ۲۲، شماره ۱، ۳۵-۱۳

آدرس نشریه: <https://karafan.nus.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2023.374528.2359



ارائه یک روش زمانبندی منابع در نسل جدید شبکه‌های محلی بی‌سیم

آزاده پیرحیاتی^۱، رضا محمدی^{۲*}، محمد نصیری^۳

- 1- دانشجوی دکتری گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
- 2- استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
- 3- دانشیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

با توجه به رشد سریع فناوری‌ها و سرویس‌های ارتباطی، پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آتی میلیاردها دستگاه از طریق اینترنت و شبکه‌های بی‌سیم به هم وصل شوند و ترافیک زیادی بین آن‌ها ارسال و دریافت شود. استاندارد نسل ششم شبکه‌های بی‌سیم به نام IEEE 802.11ax یا WiFi6 برای محیط‌های پرتراکم طراحی شده است. یکی از مسائل اصلی در شبکه‌های بی‌سیم نسل ششم، مدیریت منابع در محیط‌های پرتراکم است. افزایش تعداد ایستگاه‌ها و نیاز به سرعت و کارایی بیشتر، چالش‌های جدیدی را در زمینه زمانبندی منابع ایجاد نموده است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به افزایش تقاضای پهنای باند، تداخل فرکانسی، محدودیت منابع، زمانبندی منابع، مصرف انرژی، تاخیر و حفظ امنیت کاربران اشاره نمود. هدف ما ارائه یک روش زمانبندی منابع برای بهبود کارایی و بهره‌وری شبکه‌های بی‌سیم در محیط‌های پرتراکم و ناهمگن است که از کل فضای پهنای باند استفاده کند. در این پژوهش، یک روش برای زمانبندی منابع در نقطه دسترسی، مبتنی بر مکانیزم دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس متعامد (OFDMA) پیشنهاد شده است. این روش با استفاده از شبیه‌ساز شبکه 3-ns ارزیابی شده و نتایج نشان می‌دهد که زمانبندی پیشنهادی در معیارهای توان عملیاتی، تاخیر انتها به انتها و تاخیر سرخط نسبت به روش‌های مورد مقایسه، عملکرد بهتری دارد. در نتیجه روش پیشنهادی می‌تواند به بهبود کیفیت تجربه کاربران در محیط‌های پرتراکم و ناهمگن کمک کند.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹

کلید واژگان:

استاندارد IEEE 802.11ax

مکانیزم OFDMA

شبکه‌های محلی بی‌سیم

زمانبندی

WiFi6

*نویسنده مسئول: رضا محمدی

پست الکترونیکی:

r.mohammadi@basu.ac.ir

مقدمه

رشد سرویس‌ها و برنامه‌های متنوع مانند شهرهای هوشمند و وسایل نقلیه خودکار، همراه با گسترش گوشی‌های هوشمند، منجر به تکامل شبکه‌های بی‌سیم به سمت سیستم‌های پیشرفته‌تر شده است. با افزایش تعداد دستگاه‌ها و حجم داده‌ها در شبکه‌های پرتراکم، شبکه‌ها باید کارایی بالاتری داشته باشند. هدف اصلی شبکه‌های بی‌سیم آینده، ارتقای کیفیت تجربه کاربران در شبکه‌های پرتراکم ناهمگن است. نیازهای اصلی شامل ظرفیت بیشتر، تاخیر کمتر، کارایی بالاتر، بهره‌وری انرژی، قابلیت اطمینان و اتصال تعداد زیادی دستگاه است [۱-۳]. یکی از کاربردهای مهم شبکه‌های بی‌سیم، استفاده در دستگاه‌های اینترنت اشیا است که می‌تواند کل جهان را از طریق وب پوشش دهد. در آینده، اینترنت اشیا به یکی از اولویت‌های مهم کشورها تبدیل خواهد شد و بسیاری از کشورها استراتژی‌ها و استانداردهای ملی در این زمینه تدوین کرده‌اند. افزودن دستگاه‌های اینترنت اشیا به شبکه، چگالی عناصر شبکه را افزایش داده و به شبکه‌ای با تاخیر کم و قابلیت اطمینان بالا نیاز خواهد داشت [۱؛ ۴]. یکی از کاربردهای شبکه‌های بی‌سیم در گره‌های حسگر است که در نقاط با دسترسی دشوار قرار می‌گیرند. بهبود طول عمر و افزایش توان عملیاتی از اهداف اصلی این شبکه‌ها به دلیل محدودیت منابع انرژی است [۵]. شبکه‌های خودرویی نوعی شبکه بی‌سیم سیار هستند که جزء اساسی سیستم‌های حمل و نقل هوشمند محسوب می‌شوند. این شبکه‌ها به خودروها امکان ارتباط و تبادل اطلاعات را می‌دهند و امکانات مختلفی را فراهم می‌کنند [۶].

در محیط‌های پرتراکم مثل استادیوم، دانشکده، مجتمع مسکونی و فروشگاه زنجیره‌ای، صدها نقطه دسترسی و ایستگاه وجود دارد. در این محیط‌ها دستگاه‌های زیادی به صورت بی‌سیم به اینترنت متصل می‌شوند و به سرعت بالایی نیاز است. استاندارد IEEE 802.11ax شبکه‌های بی‌سیم، برای اتصال کاربران در استقرارهای پرتراکم معرفی شده است. هدف این استاندارد، نه تنها ارائه نرخ داده بالاتر برای هر کاربر، بلکه استفاده از منابع طیف با ترکیب ویژگی‌های پیشرفته و پیچیده است [۲؛ ۳؛ ۷؛ ۸].

یکی از اصلی‌ترین مزایایی که شبکه‌های محلی بی‌سیم (WLAN) ارائه می‌دهند، استفاده بی‌رویه از نقاط دسترسی است. این مزیت، گاهی اوقات باعث ایجاد چالش‌هایی در عملکرد این شبکه‌ها می‌شود. مهم‌ترین چالش ذاتی، سطح تداخل بالا و کنترل نشده‌ای است که در روش دسترسی به کانال شبکه‌های بی‌سیم وجود دارد. استاندارد IEEE 802.11ax مکانیزم زمانبندی خاصی برای مقابله با سطح تداخل و محدودیت ذاتی شبکه بی-سیم معرفی نکرده است. یک قابلیت این استاندارد، معرفی مکانیزم OFDMA^۲ است که می‌توان آن را در لایه کنترل دسترسی رسانه استفاده نمود. OFDMA تکنولوژی دسترسی به رسانه‌ای است که برای غلبه بر مشکل تراکم شبکه‌ها معرفی شده است و علاوه بر اینکه موجب کاهش سربار ارسال بسته‌های کوچک در نرخ‌های بالا می‌شود، موجب افزایش تراکم طیفی انرژی و در نتیجه افزایش نرخ داده کاربر می‌شود. استفاده از OFDMA امکان زمانبندی جریان‌های داده دانلود^۳ (DL) و آپلود^۴ (UL) را فراهم می‌کند و بهره‌وری OFDMA به میزان زیادی به زمانبندی منابع بین کاربران بستگی دارد [۲؛ ۹].

¹ Wireless Local Area Network

² Orthogonal Frequency Division Multiple Access

³ Downlink

⁴ Uplink

در این مقاله، یک روش زمانبندی جدید با استفاده از مکانیزم OFDMA پیشنهاد شده است که منابع را در نقطه دسترسی به گونه‌ای زمانبندی می‌کند که اکثر ایستگاه‌ها بتوانند از پهنای باند استفاده کنند. این روش با استفاده از شبیه‌ساز ns-3 و در چند سناریوی مختلف با دو روش زمانبندی دیگر مقایسه شده است. ساختار این مقاله شامل ۵ بخش است. بخش ۱ مقدمه‌ای بر موضوع مقاله است. در بخش ۲ مفاهیم پایه مرتبط با موضوع، از جمله استاندارد IEEE 802.11ax و فرآیند زمانبندی شرح داده شده است. در بخش ۳ مرور ادبیات بیان می‌شود. در بخش ۴ روش زمانبندی پیشنهادی، پیاده‌سازی در شبیه‌ساز ns-3 و معیارهای مدنظر توضیح داده شده است. در بخش ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای برای کارهای آینده بیان شده است.

۲- مفاهیم پایه

در سال‌های اخیر، نسل‌های جدیدی از شبکه‌های محلی بی‌سیم در بازار عرضه شده که بر اساس اصلاحات استاندارد شبکه‌های بی‌سیم IEEE 802.11 معرفی شده است. یکی از این استانداردهای جدید IEEE 802.11ax نام دارد که به شبکه نسل ششم (6G) معروف است. ارائه این استاندارد، یک انقلاب در بهبود عملکرد شبکه‌های بی‌سیم IEEE 802.11 است.

۲-۱- استاندارد IEEE 802.11ax

در سال ۲۰۱۴، گروه وظیفه TGax یک اصلاحیه جدید IEEE 802.11، به نام IEEE 802.11ax توسعه داد. انتظار این بود که این اصلاحیه در سال ۲۰۱۹ منتشر شود و تا حدی به چالش‌های مورد انتظار WLAN‌های پرتراکم آینده و سناریوهایی با پهنای باند بالا پاسخ دهد. در سال ۲۰۲۱ این استاندارد تاییدیه رسمی هیئت استانداردهای IEEE را دریافت کرد. استاندارد IEEE 802.11ax از روش‌های متعددی، از جمله OFDMA، QAM^۱ و TWT^۲ برای عملکرد بهتر استفاده می‌کند [۷؛ ۸]. این استاندارد مزایای متعددی ارائه می‌دهد تا بتواند سرعت بسیار بالا داشته باشد و سربار و تأخیر را کاهش دهد. QAM یا مدولاسیون ۱۰۲۴ برای ارسال در پهنای باند بیشتر از ۲۰ مگاهرتز قابل استفاده است. OFDMA دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس متعامد است. TWT یا زمان بیداری هدف، دستگاه‌ها را قادر می‌سازد تا بتوانند مشخص کنند چه زمان و چگونه از خواب بیدار شده و برای ارسال یا دریافت داده‌ها اقدام کنند [۱۰؛ ۱۱].

۲-۲- مکانیزم OFDMA

در شبکه‌های IEEE 802.11ax مکانیزم OFDMA طبق روش CSMA/CA^۳ استفاده می‌شود، یعنی نقطه دسترسی ابتدا با قانون شبکه بی‌سیم به کانال دسترسی می‌یابد، سپس می‌تواند فریم چندکاربر را در هر دو حالت دانلود و آپلود مقداردهی اولیه نماید. فریم OFDMA دو بخش دارد: بخش اول توضیحات لایه فیزیکی

¹ Quadrature Amplitude Modulation

² Target Wake-up Time

³ Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance

است که برای همه ایستگاه‌ها برابر است و بخش دوم اطلاعات مرتبط است که برای کاربران مختلف ایجاد یا محدود شده است. در ارسال‌های دانلود هیچ مشکلی وجود ندارد، زیرا فریم در نقطه دسترسی ایجاد می‌شود. در ارسال‌های آپلود این مشکل وجود دارد که فریم‌های همزمان ارسال شده از کاربران و توضیحات لایه فیزیکی که توسط کاربران تولید می‌شود، از نظر اندازه و کنترل‌ها یکسان باشند. نقاط دسترسی، فریم ماشه (TF) را برای کنترل چند هدف ارسال می‌کنند، از جمله: اجازه دسترسی رسانه، ارائه اطلاعاتی مثل مدولاسیون و نقشه‌های کدگذاری (MCS)، پارامترهایی برای تغییر قدرت ارسال، چندرودی - چندخروجی (MIMO)، دوره ارسال، بخش توضیحات لایه فیزیکی و غیره. فریم TF برای همزمان نمودن ایستگاه‌های ارسال کننده، بسیار مناسب است و فریم تاییدیه چند ایستگاه (MSBA) ارسال می‌شود تا به کاربران بگوید فریم آن‌ها موفق دریافت شده است [۱۱؛ ۱۲]. مکانیزم OFDMA، کانال را به چند واحد منبع (RU) کوچک‌تر و نه با سایز ثابت، تقسیم نموده و در زمانی کوتاه این واحدهای منبع را به کاربران مختلف اختصاص می‌دهد، در نتیجه منجر به توانایی ارسال‌های آپلود و دانلود نامحدود برای کاربران مختلف به طور همزمان می‌شود. شکل ۱ برخی از تقسیمات واحدهای منبع را برای پهنای باند ۲۰ مگاهرتز نشان می‌دهد [۱۳]. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد در استاندارد IEEE 802.11ax در پهنای باند ۲۰ مگاهرتز پارتیشن‌های مجاز برای اندازه واحدهای منبع عبارتند از: یک واحد ۲۴۲ تنی، دو واحد ۱۰۶ تنی، چهار واحد ۵۲ تنی و نه واحد ۲۶ تنی (با احتساب پارتیشن ۲۶ تنی مرکزی). عملیات مکانیزم OFDMA در IEEE 802.11ax در دو حالت آپلود و دانلود امکان‌پذیر است. در انتقال دانلود، چون نقطه دسترسی اطلاعات همه داده‌هایی که باید ارسال شود را دارد، می‌تواند دسترسی به رسانه را زمانبندی کند. در آپلود، فقط با CSMA/CA زمانبندی دسترسی از قبل امکان‌پذیر نیست. پس یک ارتباط جدید برای مبادله فریم‌ها تعریف می‌شود تا برای نقطه دسترسی، اطلاعات لازم زمانبندی آپلود را ارائه دهد [۷؛ ۱۴]. در آپلود چندکاربری هر کاربر از طریق واحد منبع اختصاصی، داده را ارسال می‌کند و به نسبت سیگنال به نویز (SNR) بالاتر در نقطه دسترسی کمک می‌کند. به طور معمول، ایستگاه‌ها قدرت انتقال خروجی کمتری نسبت به نقاط دسترسی دارند و این عدم تقارن در قدرت انتقال، توان آپلود را کاهش می‌دهد. برای جبران این عدم تقارن قدرت، نقطه دسترسی واحدهای منبع کوچک‌تری را به ایستگاه‌هایی با قدرت آپلود ضعیف اختصاص می‌دهد و SNR را برای آن ایستگاه‌ها بهبود می‌دهد [۳؛ ۱۵؛ ۱۶].

26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
52	52	26	52	52					
106-tones RU	26	106-tones RU							
242-tones RU									

¹ Trigger Frame

² Modulation and Coding Scheme

³ Multiple Input Multiple Output

⁴ Multi-STA Block Acknowledgment

⁵ Resource Unit

⁶ Signal to Noise Ratio

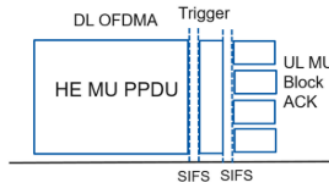
شکل ۱. برخی از تخصیص‌های واحد منبع در کانال ۲۰ مگاهرتزی [۱۳]

۳-۲- زمانبندی

در استاندارد IEEE 802.11ax زمانبندی منابع باعث افزایش ظرفیت، بهبود تجربه کاربری و افزایش عمر باتری دستگاه‌ها می‌شود. نقطه دسترسی برای ارسال‌های دانلود و آپلود از روش زمانبندی متمرکز استفاده می‌کند. در ارسال دانلود، نقطه دسترسی، فریم زمانبندی را ارسال کرده و گره‌ها پس از پاسخ در زیرکانال مربوطه، دانلود را اجرا می‌کنند. در ارسال آپلود نیز نقطه دسترسی، فریم زمانبندی را ارسال کرده و گره‌ها در زیرکانال مربوطه پاسخ می‌دهند و نقطه دسترسی، ارسال آپلود را زمانبندی می‌کند [۳].

۳-۲-۱- زمانبندی ارسال‌های دانلود

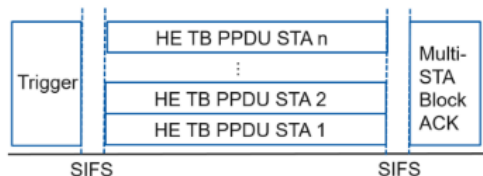
در زمانبندی ارسال دانلود، نقطه دسترسی ابتدا به کانال اصلی دسترسی پیدا می‌کند و سپس داده‌ها را به چند ایستگاه می‌فرستد. نتایج زمانبندی در فیلد خاصی از فریم واحد داده پروتکل فیزیکی (PPDU) قرار می‌گیرد. پس از دریافت فریم و انتظار به اندازه SIFS^۱، ایستگاه‌ها تاییدیه MSBA را به نقطه دسترسی ارسال می‌کنند. انتقال دانلود چندکاربری پس از دریافت تاییدیه‌ها با موفقیت انجام می‌شود [۱۴]. شکل ۲ نمایی از خط زمانی دانلود را نشان می‌دهد.



شکل ۲. خط زمانی دانلود OFDMA [۲]

۳-۲-۲- زمانبندی ارسال‌های آپلود

در زمانبندی ارسال آپلود، نقطه دسترسی پس از شمارش معکوس، منابع را بر اساس اندازه بافر آپلود و وضعیت شبکه زمانبندی می‌کند. این فرآیند شامل چهار مرحله است: تعیین تعداد و موقعیت واحدهای منبع و پهنای باند، تعیین نوع دسترسی (زمانبندی شده یا تصادفی)، نشان دادن تغییرات فضایی برای MU-MIMO^۳ و اختصاص واحدهای منبع به ایستگاه‌ها. سپس نتایج زمانبندی در فریم TF ارسال می‌شود [۱۴].



¹ Physical layer Protocol Data Unit

² Short Interframe Space

³ Multi User-Multiple Input Multiple Output

شکل ۳. خط زمانی آپلود OFDMA [۱۲؛ ۲]

شکل ۳ نمایی از خط زمانی آپلود را نشان می‌دهد.

۳- مرور ادبیات

محققان روش‌های متنوعی برای بهبود عملکرد شبکه‌های محلی بی‌سیم ارائه کرده‌اند. این روش‌ها شامل استفاده از ویژگی‌های خاص استاندارد IEEE 802.11ax مانند OFDMA و MU-MIMO، طراحی زمانبندی متمرکز در نقطه دسترسی، و توجه به انتقال‌های آپلود و دانلود است. در ادامه، چند روش برای بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری شبکه‌های محلی بی‌سیم در استاندارد IEEE 802.11ax معرفی می‌شود.

ایسلام و کاشم [۱۷]، الگوریتمی به نام ERA را برای تخصیص منابع در آپلود شبکه‌های 802.11ax معرفی نمودند که با بهره‌گیری از OFDMA بازده شبکه را افزایش دهد و ارسال مجدد بسته‌ها را کاهش دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این روش در محیط‌های پرتراфик عملکرد بهتری نسبت به روش‌های پایه دارد. مزیت اصلی آن طراحی نوآورانه برای بهبود بهره‌وری و پایداری است، اما محدودیتش تمرکز صرف بر آپلود و نبود مقایسه جامع با الگوریتم‌های پیشرفته‌تر است.

ماگرین و همکاران [۱۸]، به اعتبارسنجی پیاده‌سازی OFDMA در شبیه‌ساز ns-3 پرداختند و صحت و کارایی پیاده‌سازی OFDMA در ns-3 را تایید نمودند. ماگرین و همکاران در [۱۳] به ارزیابی عملکرد OFDMA از طریق تحلیل تئوری و شبیه‌سازی پرداختند. آن‌ها دو تابع زمانبندی به نام bw به روش نوبت گردشی و hol بر اساس مدل ریاضی bianchi 802.11 [۱۹]، را در نظر گرفتند که هم در تحلیل و هم در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دهند. ارزیابی عملکرد OFDMA نشان داد که با پیش‌بینی‌های یک مدل رویکرد تحلیلی در برخی از سناریوهای ساده شده مطابقت دارد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی این پیاده‌سازی نشان داد که عملکرد مطلوبی دارد. آن‌ها توانستند نتایج تطبیق توان عملیاتی و میانگین تاخیر سرخط (HoL) را در طیف وسیعی از پارامترها، از جمله MCS، پهنای باند، الگوریتم زمانبندی، دنباله ACK^۲، تعداد ایستگاه و پارامترهای رقابت تأیید کنند. ارایه روش‌های بهبود و توسعه برای این پیاده‌سازی به‌طور دقیق بررسی نشده است. همچنین می‌توان زمانبندی‌های بهتری را با کنار گذاشتن این فرض که فقط می‌توان از واحدهای منبع با اندازه یکسان استفاده کرد، طراحی نمود.

بلالتا و همکاران [۲۰] یک مدل جامع OFDMA برای آپلود و دانلود در استاندارد IEEE 802.11ax ارائه دادند که بهبود عملکرد و کارایی شبکه‌های بی‌سیم را بررسی می‌کند. نقاط قوت این رویکرد شامل افزایش ظرفیت شبکه، کاهش تداخل، افزایش کارایی و بهبود کیفیت خدمات است. نقطه ضعف آن، پیچیدگی پیاده‌سازی و احتمال وقفه‌های بیشتر به دلیل افزایش تعداد کاربران همزمان است.

داولس و همکاران [۲۱] روش زمانبندی WMM^۳ مبتنی بر حفظ عدالت را پیشنهاد دادند که با استفاده از بهینه‌سازی Lyapunov، زمانبندی پویای ارتباطات دانلود OFDMA را بهبود می‌بخشد. این روش به تخصیص بهتر منابع در شبکه کمک می‌کند، اما پیاده‌سازی آن پیچیده و پرهزینه است.

^۱ Head-of-Line

^۲ Acknowledgment

^۳ Weighted Max-Min

پیرو و همکاران [۲۲]، زمانبندی دانلود را مبتنی بر دو لایه مطرح نمودند. لایه بالایی، یک سیستم کنترل تصمیم‌گیری برای تعیین میزان داده ارسالی دارد و لایه پایینی، یک الگوریتم عدالت نسبی برای انتساب بلاک‌های منبع است. از مزایای این راهکار افزایش نرخ بیت و بهره‌وری در ارتباطات دانلود و بهبود توانایی استفاده از طیف فرکانسی است و اشکال این راهکار می‌تواند پیچیدگی زیاد در پیاده‌سازی الگوریتم و نیاز به پردازش و محاسبات بیشتر باشد.

فیلسو و همکاران [۸]، یک زمانبند تخصیص منابع با مکانیزم OFDMA پیشنهاد دادند که شامل کنترل بازخورد با بهره نسبی است و اولویت و عدالت را همزمان در نظر می‌گیرد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که این روش عملکرد شبکه و کیفیت سرویس را بهبود می‌بخشد و در مقایسه با الگوریتم‌های موجود، نتایج بهتری از نظر توان عملیاتی، تأخیر و انصاف دارد.

آفاکی و همکاران [۲۳]، الگوریتم کنترل حساسیت پویا برای استاندارد IEEE 802.11ax را بررسی نمودند. این الگوریتم با تنظیم آستانه گوش دادن به کانال بر اساس قدرت سیگنال دریافتی، عملکرد و کیفیت ارتباطات بی‌سیم را بهبود می‌بخشد. با این حال، نتایج ارزیابی ممکن است کامل نباشد و اثرات جانبی بر سایر اجزای شبکه بررسی نشده است.

بانکو و همکاران [۲۴]، زمانبند^۱ MUTAX را برای حداقل نمودن متوسط زمان آپلود تعداد زیادی کاربر ارائه دادند. آن‌ها از یک الگوریتم زمانبندی برای کاهش تأخیر در ارسال داده‌ها از ایستگاه‌ها به نقطه دسترسی استفاده نمودند که موجب بهبود عملکرد شد. در این کار مسئله کاربردی و مهم زمانبندی در شبکه‌های بی‌سیم بررسی شده است ولی الگوریتم فقط برای ارسال‌های آپلود مورد بررسی قرار گرفته است.

بانکو و همکاران [۱۲]، نیز روی جریان داده آپلود تمرکز نموده و الگوریتم‌های زمانبندی OFDMA در شبکه‌های IEEE 802.11ax را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. OFDMA با استفاده از یک باند فرکانسی به چند کاربر امکان ارسال همزمان داده‌ها را فراهم می‌کند. نقطه قوت این روش ارائه راه‌حل‌های بهینه‌سازی برای بهبود عملکرد شبکه در مورد ارسال بسته‌ها از طریق OFDMA است. از طرفی در این کار فقط داده‌های آپلود در نظر گرفته شده است.

کونستانینوس و بلاتا [۲۵]، با زمانبندی و تخصیص منابع OFDMA در حالت آپلود، بهره متوسط نرخ بلندمدت ایستگاه‌های مشمول نرخ متوسط و انرژی محدود را با استفاده از روش بهینه‌سازی Lyapunov حداکثر نمودند. آن‌ها چگونگی تخصیص بهینه منابع برای عملکرد بهتر شبکه‌های بی‌سیم را بررسی نمودند. نتایج این تکنولوژی باعث بهبود عملکرد و کارایی شبکه می‌شود. در این کار نیز فقط داده‌های آپلود در نظر گرفته شدند.

هاتارای و همکاران [۲۶]، کارایی آپلود OFDMA را در دو حالت، تجزیه و تحلیل نمودند. حالت اول تعداد دسترسی زمانبندی شده و حالت دوم تعداد دسترسی تصادفی به واحدهای منبع را در نظر می‌گیرد. در واقع آن‌ها به تخصیص منابع ارتباطی در شبکه‌های بی‌سیم IEEE 802.11ax پرداختند. روش‌های بهینه‌سازی تخصیص منابع ارتباطی برای افزایش کارایی و کیفیت ارتباط در این شبکه‌ها ارائه شده است.

^۱ Minimizing Upload Time in 11AX

بای و همکاران [۲۷]، طرح گروه‌بندی تصادفی^۱ UORA را برای آپلود OFDMA ارائه دادند. این طرح عملکرد آپلود در شبکه‌های متراکم را بهبود می‌بخشد و تداخل بین ترافیک‌ها را کاهش می‌دهد. ویژگی این روش، انتخاب تصادفی گروه‌های کاربران با تأخیر پایین و زمان پاسخ سریع است. اما، نیاز به محاسبات بیشتر و احتمال خطا در انتخاب گروه‌ها از نقاط ضعف آن است.

ایلون و همکاران [۲۸] نشان دادند که استفاده از OFDMA در شرایط غیراشباع می‌تواند تاخیر متوسط را از ۵ میلی‌ثانیه به کمتر از ۱ میلی‌ثانیه کاهش دهد. همچنین، ترکیب OFDMA با گزارش وضعیت بافر چندکاربری و مکانیزم‌های محدود EDCA^۲ توان اشباع را بیش از ۱۰ درصد افزایش می‌دهد.

پارک [۲۹]، الگوریتم زمانبندی چندکاربری SMT^۳ را برای انتقال‌های آپلود و دانلود در MU-MIMO پیشنهاد داد. پارک نشان داد که این الگوریتم می‌تواند توان لایه کنترل دسترسی رسانه را ۷۰ تا ۸۷ درصد در مقایسه با انتقال‌های آپلود و دانلود برای MU-MIMO بهبود بخشد. الگوریتم SMT برای تحلیل عملکرد فریم TF در انتقال‌های MU-MIMO، از چندین آنتن در هر طرف برای ارسال و دریافت اطلاعات استفاده می‌کند که بهبود قابل توجهی در کارایی شبکه ایجاد می‌کند.

جدول ۱. خلاصه مطالعات انجام شده

نویسندگان	سال چاپ	کنترل تخصیص منابع	تطبیق کیفیت سرویس	اعتبار سنجی استاندارد	زمانبندی آپلود OFDMA	زمانبندی دانلود OFDMA	آلتایز عملکرد	بهبود عملکرد	کنترل حساسیت پویا	بررسی تاخیر	ارسال MU-MIMO
فیلسو و همکاران [۸]	۲۰۲۰	*	*								
ماگرین و همکاران [۱۸]	۲۰۲۱			*							
بانکو و همکاران [۱۲]	۲۰۱۸				*						
ایسلام و کاشم [۱۷]	۲۰۲۰			*			*				
باللتا و همکاران [۲۰]	۲۰۱۹									*	
داولس و همکاران [۲۱]	۲۰۲۰				*						
پیرو و همکاران [۲۲]	۲۰۱۱				*						
افاکی و همکاران [۲۳]	۲۰۱۵						*	*			
بانکو و همکاران [۲۴]	۲۰۱۷			*						*	

¹ Uplink OFDMA Random Access

² Enhanced Distributed Channel Access

³ Scheduled MU Transmission

*	۲۰۱۸	[۲۵]	کونستانتینوس و بلانتا
*	۲۰۱۹	[۲۶]	هاتارای و همکاران
*	۲۰۱۸	[۲۷]	بای و همکاران
*	۲۰۲۱	[۲۸]	ایلون و همکاران
*	۲۰۲۱	[۲۹]	پارک
*	۲۰۲۳	[۳۰]	پنگ و همکاران

پنگ و همکاران [۳۰]، چالش‌های مدیریت تأخیر دسترسی را بررسی و روشی برای بهبود عملکرد منابع در شبکه‌های چندکاربری پیشنهاد دادند. طرح آن‌ها تخصیص منطقی واحدهای منبع بر اساس توزیع ترافیک است که در شبیه‌سازی‌ها عملکرد بهتری از نظر تأخیر دسترسی و استفاده از منابع در سناریوهای پرتراکم نشان داد. این روش ممکن است تنها در شرایط خاصی قابل اجرا باشد. خلاصه مطالعات انجام شده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

به طور خلاصه، مطالعات قبلی به صورت تحلیلی یا مبتنی بر شبیه‌سازی استاندارد IEEE 802.11ax انجام شده‌اند. در مقایسه کیفی این مقالات در زمینه زمانبندی منابع در نسل جدید شبکه‌های محلی بی‌سیم IEEE 802.11ax، چندین رویکرد و روش مختلف را بررسی نموده‌ایم و در جدول ۲ مقایسه کیفی برخی از مقالات اخیر را نشان داده‌ایم. این مقالات هر کدام با رویکردهای مختلف به بهبود کارایی و کیفیت خدمات در شبکه‌های محلی بی‌سیم نسل جدید پرداخته‌اند که نشان‌دهنده تنوع و گستردگی تحقیقات در این زمینه هستند. در سطر آخر جدول، ویژگی‌های رویکرد پیشنهادی آورده شده است.

جدول ۲. مقایسه کیفی مقالات اخیر

نویسندگان	سال چاپ	نوآوری اصلی	ابزار ارزیابی	معیارهای ارزیابی	نتایج	کاربردها
فیلوسو و همکاران [۸]	۲۰۲۰	تخصیص منابع مبتنی بر اولویت و عدالت برای کنترل QoS	matlab	تأخیر، توان عملیاتی و بهره‌وری طیفی	بهبود در تأخیر و توان عملیاتی	محیط‌های پرتراکم و با ترافیک بالا
ماگرین و همکاران [۱۸]	۲۰۲۱	ارزیابی عملکرد و اعتبارسنجی پیاده‌سازی OFDMA در ns-3	ns-3	تأخیر، توان عملیاتی و بهره‌وری طیفی	تأیید صحت و کارایی پیاده‌سازی OFDMA در ns-3 مرتبط	تحقیقات و توسعه شبکه‌های WiFi6 و بهبود شبیه‌سازی‌های مرتبط
بلانتا و همکاران [۲۰]	۲۰۱۹	معرفی و تحلیل انتقالات چندکاربره نقطه دسترسی با استفاده از MU-OFDMA MIMO	matlab	توان عملیاتی، تأخیر و بهره‌وری طیفی	بهبود توان عملیاتی و کاهش تأخیر	محیط‌های پرتراکم و با تعداد زیاد کاربران
داولس و	۲۰۲۰	زمان‌بندی مبتنی بر	ابزار ریاضی	توان عملیاتی،	بهبود عملکرد و	محیط‌های پرتراکم

همکاران [۲۱]	عدالت حداکثر- حداقل OFDMA	و شبیه‌سازی عددی	تاخیر و بهروری طیفی	حداکثرسازی نرخ محدود شده	و با ترافیک بالا
هاتاری و همکاران [۲۶]	۲۰۱۹	تخصیص منابع برای uplink با استفاده از OFDMA	ابزار ریاضی و ns-3	توان عملیاتی، تاخیر و بهروری طیفی	محیط‌های پرتراکم و با ترافیک بالا
آیلون و همکاران [۲۸]	۲۰۲۱	بررسی و تحلیل عملکرد OFDMA برای بهبود بهروری طیفی و کاهش تأخیر	ابزار ریاضی و شبیه‌سازی با ns-3	توان عملیاتی، تاخیر و بهروری طیفی	محیط‌های پرتراکم و با ترافیک بالا
پارک [۲۹]	۲۰۲۱	تحلیل عملکرد فریم تریگر در انتقالات چندکاربره	تحلیل ریاضی و شبیه‌سازی عددی	توان عملیاتی، تاخیر و احتمال برخورد	محیط‌های پرتراکم و با ترافیک بالا
پنگ و همکاران [۳۰]	۲۰۲۳	تخصیص منابع تطبیقی برای uplink بر اساس تحلیل تأخیر دسترسی	ابزار ریاضی و شبیه‌سازی عددی	توان عملیاتی، تاخیر دسترسی و بهروری طیفی	محیط‌های پرتراکم و با ترافیک بالا
روش پیشنهادی د ر این پژوهش		زمانبندی پویای منابع، مبتنی بر OFDMA و صف	ns-3	توان عملیاتی، تاخیر انتها به انتها، تأخیر سرخط	بهبود توان عملیاتی، کاهش تاخیر انتها به انتها و کاهش تاخیر سرخط

۴- روش پیشنهادی

در این مقاله یک روش برای زمانبندی واحدهای منبع در نقطه دسترسی معرفی می‌کنیم. همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، در مکانیزم OFDMA از استاندارد IEEE 802.11ax، نقطه دسترسی باید نحوه تخصیص پهنای باند موجود را تعیین کند و این تخصیص را به صورت زمانبندی ارائه دهد. به عنوان مثال برای سرویس-دهی به ایستگاه‌ها در باند ۲۰ مگاهرتزی، زمانبندیهای مختلف ترکیب‌هایی از واحدهای منبع ذکر شده در شکل ۱ را به‌کار می‌برند.

روش پیشنهادی ما برای زمانبندی واحدهای منبع شبکه‌های محلی بی‌سیم، دو نوآوری کلیدی دارد. نوآوری اول، تخصیص پویا و بهینه منابع است، یعنی برخلاف روش‌های سنتی که پهنای باند را به واحدهای منبع با اندازه‌های ثابت تقسیم می‌کنند، روش ما به صورت پویا و بر اساس تعداد ایستگاه‌ها و مصرف کل پهنای باند، واحدهای منبع را به ایستگاه‌ها تخصیص می‌دهد. این رویکرد باعث می‌شود که استفاده از پهنای باند به حداکثر برسد و از هدر رفتن منابع جلوگیری شود. نوآوری دوم، انعطاف‌پذیری در تخصیص واحدهای منبع و زمانبندی صف‌محور است، یعنی روش پیشنهادی، محدودیتی برای تخصیص واحدهای منبع هم‌اندازه ایجاد نمی‌کند و

ایستگاه‌هایی که داده برای انتقال دارند، در یک صف قرار می‌گیرند و به ترتیب قرارگیری در صف، سرویس داده می‌شوند. این مکانیزم تضمین می‌کند که همه ایستگاه‌ها به نوبت سرویس بگیرند. به عبارت دیگر بر اساس میزان داده هر ایستگاه و پهنای باند موجود، تعداد و اندازه واحدهای منبع برای تخصیص تعیین می‌شود.

در روش پیشنهادی، برای تخصیص واحدهای منبع هر دو مورد تعداد ایستگاه‌ها و مصرف کل پهنای باند را با هم در نظر می‌گیریم. همچنین فرض می‌شود که حداکثر مدت زمان مجاز برای یک PPDU برابر با حداکثر مدت زمان مجاز برای یک TXOP^۱ است، با این فرض که هر TXOP برای انتقال یک واحد داده PPDU و ACK مربوطه استفاده شود. یعنی ایستگاه‌هایی که داده برای انتقال دارند، در یک صف قرار می‌گیرند و زمانی که یک TXOP جدید در دسترس باشد، ایستگاه‌ها به ترتیب قرارگیری در صف، سرویس داده می‌شوند. در تابع زمانبندی مدنظر محدودیتی برای تخصیص واحدهای هم‌اندازه ایجاد نمی‌کنیم. به عنوان مثال در پهنای باند ۲۰ مگاهرتز برای تعداد ۴ ایستگاه، تابع مقدار ۴ برمی‌گرداند، یعنی برای انتقال هر ایستگاه یک واحد منبع ۵۲ تنی یا ۴ واحد منبع با اندازه‌های مختلف تخصیص می‌دهد. برای ۷ ایستگاه، ۷ واحد منبع با اندازه‌های متفاوت تخصیص داده می‌شود که این امر باعث استفاده بهینه‌تر از پهنای باند می‌شود. در نهایت، اگر تعداد درخواست ایستگاه‌ها بیشتر از ۹ باشد به ۹ تا از آن‌ها سرویس می‌دهد و بقیه در صف منتظر می‌مانند. نکته قابل توجه این است که در این نوع تخصیص الزاما اندازه واحدهای منبع تخصیص‌یافته برای ایستگاه‌ها یکسان نیست و واحدهای منبع طوری اختصاص می‌یابند که تا حد امکان از کل پهنای باند استفاده شود. شبه‌کد الگوریتم روش پیشنهادی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. شبه‌کد الگوریتم روش پیشنهادی

Pseudocode of the proposed algorithm

Input: List of stations (STAs) with data to transmit, Total bandwidth (BW), and Resource Unit (RU) sizes

Output: Allocation of RUs to STAs

1. Initialize BW and RU sizes
2. Create a queue for STA with data to transmit
3. While there are STAs in the queue:
 4. Initialize remaining BW
 5. Create a list of current allocations
 6. While remaining BW > 0 and queue is not empty:
 7. Get the next STA from the queue
 8. Determine the RU size based on remaining BW and STA data size in the current TXOP
 9. If RU size fits in remaining BW:
 10. Allocate RU to the STA
 11. Update remaining BW and Remove the served STAs from the queue
 12. Else:
 13. Push the STA back to the queue
 14. Store the current allocations
 15. Return the allocation of RUs to STAs
 16. End Algorithm

¹ Transmit opportunity

همان‌طور که در شبه‌کد الگوریتم مشاهده می‌شود ورودی‌های الگوریتم شامل لیست ایستگاه‌ها (STAs) با داده‌هایی برای ارسال، پهنای باند کل (BW) و اندازه واحدهای منبع (RU) است و خروجی آن تخصیص واحدهای منبع به ایستگاه‌ها در هر بازه زمانی است. الگوریتم در گام ۱ پهنای باند و اندازه واحدهای منبع را مقداردهی اولیه می‌کند. در گام ۲ ایستگاه‌هایی که داده‌هایی برای ارسال دارند را به ترتیب ورود در یک صف قرار می‌دهد. در گام ۳ تا ۵ تا زمانی که صف ایستگاه‌ها خالی نشده است، پهنای باند باقی‌مانده را مقداردهی می‌کند و یک لیست برای ذخیره تخصیص‌های فعلی ایجاد می‌کند. در گام ۶ تا ۱۰ تا زمانی که پهنای باند باقی‌مانده وجود دارد و صف خالی نیست، در هر مرحله ایستگاه بعدی را از صف خارج کرده و اندازه واحد منبع را بر اساس پهنای باند باقی‌مانده و اندازه داده انتخاب می‌کند. سپس بررسی می‌کند که آیا اندازه واحد منبع در پهنای باند باقی‌مانده جا می‌شود یا خیر. اگر اندازه واحد منبع کمتر از پهنای باند باقی‌مانده باشد، ادامه می‌دهد و واحد منبع را به ایستگاه‌ها تخصیص می‌دهد. در گام ۱۱ پهنای باند باقی‌مانده را به‌روزرسانی نموده و ایستگاه‌های سرویس داده شده را از صف حذف می‌کند. در گام ۱۲ تا ۱۴ اگر اندازه واحد منبع در پهنای باند باقی‌مانده جا نشود، ایستگاه را به صف بازمی‌گرداند و تخصیص‌های فعلی را در لیست تخصیص‌ها ذخیره می‌کند. در گام آخر تخصیص واحدهای منبع را به ایستگاه‌ها ارسال می‌کند تا هر ایستگاه بداند چه زمانی انتقال انجام دهد.

نحوه عملکرد و تخصیص منابع داده در روش پیشنهادی برای یک حالت در پهنای باند ۲۰ مگاهرتز در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴. نحوه تخصیص RU ها در روش پیشنهادی برای پهنای باند ۲۰ مگاهرتز

تعداد ایستگاه	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>9
تخصیص تعداد واحدهای منبع هم اندازه	1*24 2- tone s	2*106- 6- tones s	2*10 6- tone s	4*52- tones	4*52 - tones	3*52- tones	2*52 - tone s	1*52- tones	9*26- 6- tones s	9*2 s
تخصیص سایر واحدهای منبع	-	-	1*26 - tone s	-	1*26 - tones	3*26- tones	5*26 - tone s	7*26- tones	-	-

۴-۱- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های موجود

روش پیشنهادی را با دو تابع زمانبندی bw و hol [۱۳] که در بخش مرور ادبیات بیان شد، مقایسه نمودیم. در هر دو تابع برای سادگی، فرض شده که پهنای باند را فقط می‌توان در واحدهای منبعی تقسیم نمود که اندازه

یکسانی دارند. در تابع زمانبندی bw [۱۳] فرض شده که ایستگاه‌ها به روش نوبت چرخشی سرویس داده می‌شوند. یعنی ایستگاه‌ها در یک صف قرار می‌گیرند و زمانی که یک TXOP جدید در دسترس است، ایستگاه‌های جلوی صف سرویس داده می‌شوند و بلافاصله دوباره به همان ترتیب در صف قرار می‌گیرند. در این روش، نقطه دسترسی تلاش می‌کند کل پهنای باند را تخصیص دهد. یعنی، تابع زمانبندی حداقل تعداد واحدهای منبع را به گونه‌ای انتخاب می‌کند که بتواند حداکثر ایستگاه‌ها را بدون اتلاف واحد منبع سرویس دهد. بنابراین در پهنای باند ۲۰ مگاهرتز برای تعداد ۴ ایستگاه، تابع مقدار ۴ برمی‌گرداند، یعنی هر ایستگاهی یک واحد منبع ۵۲ تنی در اختیار دارد. به طور مشابه برای ۷ ایستگاه، نیز ۴ برمی‌گرداند یعنی هر بار ۴ تا از ایستگاه‌ها با واحدهای منبع ۵۲ تنی سرویس داده می‌شوند. این زمانبند به دلیل زمان طولانی‌تر بین TXOP‌های متوالی، برای سرویس به یک ایستگاه خاص، استفاده از پهنای باند را حداکثر می‌کند. وقتی تعداد ایستگاه‌ها از یک بیشتر باشد، یعنی به برخی از ایستگاه‌ها در TXOP فعلی نمی‌توان سرویس داد. در نهایت، وقتی خروجی تابع ۹ باشد یعنی ۹ ایستگاه به یک کانال با ۹ زیرحامل ۲۶ تنی اختصاص داده می‌شود. تابع زمانبندی hol [۱۳] سعی می‌کند حداکثر تعداد ایستگاه‌های ممکن را در یک TXOP قرار دهد. در این روش نقطه دسترسی تصمیم می‌گیرد که از برخی از واحدهای منبع استفاده نکند، یعنی با توجه به تعداد ایستگاه‌ها ممکن است مقداری از پهنای باند به هدر برود. در این مورد، رفتار زمانبند برای تعداد ۴ ایستگاه مانند تابع قبل خواهد بود، در حالی که برای ۷ ایستگاه عدد ۹ را برمی‌گرداند یعنی ارسال هر ایستگاه در یک واحد منبع با سایز ۲۶ تن انجام می‌شود و از ۲ واحد منبع استفاده نمی‌شود. در این روش تعداد ارسال بیشتر به دلیل استفاده از پهنای باند کوچک‌تر موجود، اتفاق می‌افتد. یک نمونه خروجی این زمانبندها برای پهنای باند ۲۰ مگاهرتز در جدول ۵ آورده شده است که در ردیف اول تعداد ایستگاه‌های موجود و در ردیف‌های دوم و سوم، خروجی توابع f_{bw} و f_{hol} یعنی تعداد واحدهای منبع انتخاب شده برای سرویس‌دهی در یک TXOP را نشان می‌دهد [۱۳؛ ۱۸].

جدول ۵. خروجی تعداد RUهای یکسان انتخاب شده در توابع زمانبندی bw و hol [۱۳]

تعداد ایستگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	>۹
تابع bw [۱۳]	۱	۲	۲	۴	۴	۴	۴	۴	۹	۹
تابع hol [۱۳]	۱	۲	۴	۴	۹	۹	۹	۹	۹	۹

این دو روش امکان بررسی آسان رویکردهای تحلیلی و شبیه‌سازی را فراهم می‌کنند. همچنین دو حالت را پوشش می‌دهند: در حالت اول نقطه دسترسی کل پهنای باند را تخصیص می‌دهد و در حالت دوم نقطه دسترسی تصمیم می‌گیرد که از برخی از واحدهای منبع استفاده نکند.

۲-۴- پیاده‌سازی استاندارد IEEE 802.11ax در ns-3

ns-3 یک شبیه‌ساز شبکه رویداد گسسته در سطح سیستم با طراحی ماژولار است و هر جزء آن شامل مجموعه‌ای از کلاس‌ها برای توصیف رفتار یک فناوری ارتباطی است [۳۱]. ماژول بی‌سیم این شبیه‌ساز از استانداردهای 802.11 a/b/g/n/ac پشتیبانی می‌کند و برای مدل‌سازی رفتار IEEE 802.11ax توسعه یافته است. این شبیه‌ساز از ویژگی‌های جدید، ارتباطات OFDMA هم در لایه فیزیکی و هم در لایه کنترل دسترسی رسانه پشتیبانی می‌شود [۱۳].

۳-۴- راه‌اندازی شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی، نتایج روش پیشنهادی با نتایج دو تابع زمانبندی دیگر مقایسه شده است. در نمودارها، زمانبندی hol و زمانبندی bw و زمانبندی پیشنهادی با نام proposed نشان داده شده است. برای ارزیابی معیارها و نتایج از SEM^۱ در شبیه‌ساز ns-3 استفاده شده است. SEM یک کتابخانه پایتون برای اجرای چند اسکریپت ns-3، مدیریت نتایج و جمع‌آوری آن‌ها در ساختارهای داده سازگار با پردازش است. پارامترهای شبیه‌سازی و مقدار آن‌ها در جدول ۶ آمده است.

۴-۴- معیارها

برای ارزیابی نتایج روش پیشنهادی از سه معیار توان عملیاتی، تاخیر انتها به انتها و تاخیر سرخط استفاده شده است. این بخش شامل نمودارهای خروجی این معیارها برای مقایسه سه روش زمانبندی است. برای رسم نمودارهای خروجی و حصول نتیجه بهتر، میانگین ۱۰ بار اجرای شبیه‌سازی، با مقادیر تصادفی برای تعداد ایستگاه‌ها و مقادیر متغیر قابل قبول برای پارامترهای چندمقداری، نشان داده شده است.

جدول ۶. پارامترهای شبیه‌سازی

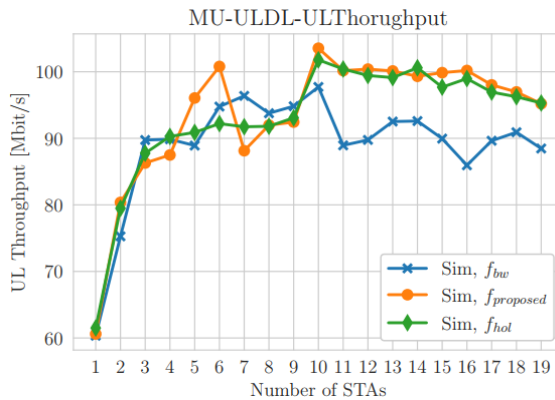
نام پارامتر	مقدار	نام پارامتر	مقدار
تعداد ایستگاه‌ها	تصادفی بین ۱ تا ۲۰	اندازه فریم	۱۰۰۰
شعاع شبکه	۱۰ متر	نوع ترافیک	UDP
قدرت ارسال نقطه دسترسی	۱۷	گروه دسترسی	BE
قدرت ارسال ایستگاه	۱۷	نرخ ترافیک لایه کاربرد	۱۰۰
MCS	۱۱	عرض کانال	۲۰
طول عمر MSDU	۲۰ میلی ثانیه	حداکثر طول پارامتر Txop	۴۸۰۰
تعداد هسته سیستم عامل	۴	مدل تلفات انتشار	Friis

^۱ Simulation Execution Manager

دوره Beacon	۲۰۴۸۰ میلی ثانیه	نرخ داده	CBR
اندازه CW_{Min}	۱۵-۱۲۷-۱۰۲۳	زمان شبیه‌سازی	۵ ثانیه

۴-۴-۱- توان عملیاتی آپلود

توان عملیاتی، میزان داده‌های موفق انتقال یافته از یک منبع به مقصد در یک بازه زمانی مشخص است. این معیار به طور خاص برای ارزیابی کارایی شبکه‌های بی‌سیم استفاده می‌شود و نشان‌دهنده توانایی شبکه در انتقال داده‌ها به صورت موثر و کارآمد است. شکل ۴ مجموع توان عملیاتی آپلودها را برای سه زمانبندی شرح داده شده در انتقال چند کاربری، نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای هر سه روش زمانبندی در تعداد ایستگاه بین ۱ تا ۹ توان عملیاتی نزدیک به هم است و تفاوت مشاهده شده به علت تفاوت در روش تخصیص است ولی بعد از آن با افزایش تعداد ایستگاه‌ها در محیط‌های پرتراکم، زمانبندی پیشنهادی و زمانبندی hol نسبت به bw، توان عملیاتی بیشتر و نزدیک به هم ارائه می‌دهند. نتایج نشان داده شده در این نمودار برای شبکه‌ای است که در آن فقط ایستگاه‌های نسل ششم مستقر شده و ترافیک ایجاد می‌کنند.

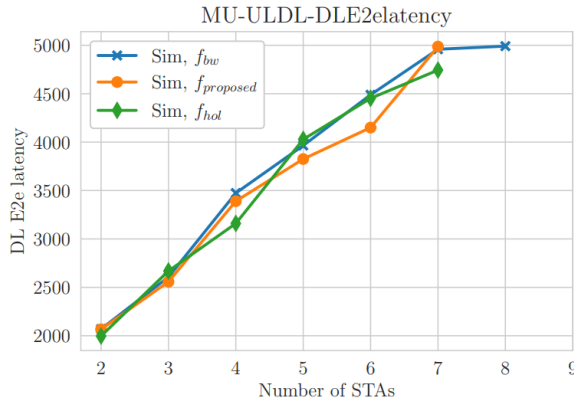


شکل ۴. مجموع توان عملیاتی آپلودها برای تعداد مختلفی ایستگاه با ترافیک‌های دانلود و آپلود

۴-۴-۲- تأخیر انتها به انتهای دانلود و آپلود

تاخیر انتها به انتها مجموع زمان‌هایی است که یک بسته داده از لحظه ارسال از منبع تا لحظه دریافت در مقصد طی می‌کند. این معیار شامل تمام تأخیرهای موجود در مسیر انتقال داده، از جمله تأخیرهای صف، پردازش، و انتقال است. شکل ۵ نمودار تاخیر انتها به انتها را برای ترافیک‌های دانلود و آپلود نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتیجه تاخیر روش پیشنهادی در کل کمتر شده است، زیرا در این روش هدف این است که حداکثر ایستگاه‌ها سرویس داده شوند و ایستگاه‌های کمتری منتظر بمانند. در واقع روش bw به علت اینکه کل پهنای باند را برای حداقل ایستگاه‌ها استفاده می‌کند، ایستگاه‌های بیشتری را منتظر نگه می‌دارد و در

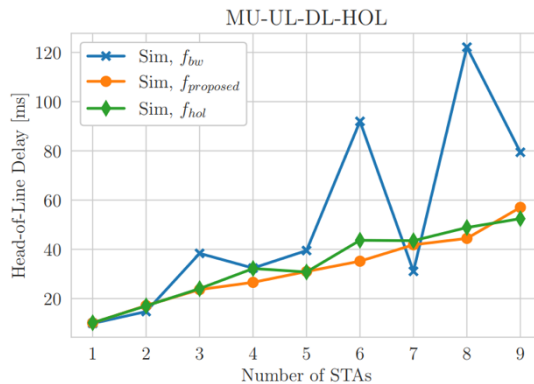
نتیجه میزان تأخیر بالاتری را ایجاد می‌کند، ولی دو روش دیگر به علت اینکه به حداکثر ایستگاه‌ها سرویس می‌دهند، تأخیر کمتری ایجاد می‌کنند.



شکل ۵. تأخیر انتها به انتها برای ترافیک‌های دانلود و آپلود

۴-۳- نرخ تأخیر سرخط (HOL)

معیار HOL مدت زمانی است که یک بسته داده در صف انتظار می‌ماند تا به اولین موقعیت صف برسد و بتواند ارسال شود. این معیار نشان‌دهنده تأخیر زمانی است که بسته‌ها به دلیل تراکم شبکه و زمانبندی صف‌ها تجربه می‌کنند. به عبارت دیگر تأخیر سرخط، متوسط فاصله زمانی بین دو ارسال متوالی به یک ایستگاه است. شکل ۶ میانگین تأخیر سرخط را زمانی که ترافیک‌های دانلود و آپلود توسط نقطه دسترسی تولید می‌شود، برای سه نوع زمانبندی نشان می‌دهد. در این مورد، زمانبند bw میانگین زمانی طولانی‌تری را بین ارسال‌های مجدد متوالی به یک ایستگاه ایجاد می‌کند، در حالی که زمانبند hol میانگین زمانی کوتاه‌تری را بین ارسال‌های مجدد متوالی به یک ایستگاه ایجاد می‌کند و زمانبندی پیشنهادی نسبت به دو زمانبند دیگر میانگین تأخیر کمتری ایجاد می‌کند.



شکل ۶. تأخیر HOL برای تعداد ایستگاه‌های مختلف

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تفاوت بین عملکرد سه زمانبندی، بیشتر در نقاطی قابل مشاهده است که خروجی سه تابع تخصیص واحد منبع متفاوت است (برای اطلاعات بیشتر به جداول ۲ و ۳ که توصیف توابع زمانبندی در نظر گرفته شده است، مراجعه نمایید).

۵- نتیجه‌گیری

رشد سرویس‌ها و برنامه‌های متنوع و گسترش گوشی‌های هوشمند، شبکه‌های بی‌سیم را به سمت سیستم‌های پیشرفته‌تر سوق داده است. نسل بعدی شبکه‌های محلی بی‌سیم، WiFi6 نام دارد که با استاندارد IEEE 802.11ax، بر بهبود کارایی طیف در محیط‌های پرتراکم تمرکز دارد. در این مقاله، یک روش زمانبندی جدید با مکانیزم OFDMA در نقطه دسترسی پیشنهاد شده که در شبیه‌ساز ns-3 پیاده‌سازی و با دو روش زمانبندی دیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از نظر توان عملیاتی، تاخیر انتها به انتها و تاخیر سرخط عملکرد بهتری دارد. برای کارهای آینده، می‌توان نوع زمانبندی را تغییر داد و بر اساس پارامترهای شبکه و رقابت بین ایستگاه‌ها زمانبندی نمود. همچنین، زمانبندی می‌تواند به صورت توزیع شده انجام شود و اطلاعات در هر ایستگاه جمع‌آوری و تصمیم‌گیری شود. برای بهبود عملکرد، می‌توان انواع حالت‌های تخصیص واحدهای منبع را بررسی و با الگوریتم‌های هوشمند بهترین حالت تخصیص را به دست آورد.

منابع

- [1] Bai, J. (2018). *Performance Enhancement of IEEE 802.11 AX in Ultra-Dense Wireless Networks* [Master's thesis, The University of Western Ontario]. Canada. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/5938>
- [2] Naribole, S., Lee, W. B., & Ranganath, A. (2019). *Impact of MU EDCA channel access on IEEE 802.11 ax WLANs*. 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall), 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2019.8891575>
- [3] Qu, Q., Li, B., Yang, M., Yan, Z., Yang, A., Deng, D.-J., & Chen, K.-C. (2019). *Survey and performance evaluation of the upcoming next generation WLANs standard-IEEE 802.11 ax*. Mobile Networks and Applications, 24, 1461-1474. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11036-019-01277-9>
- [4] Ahadiani, M., Masoudi, O. A., Malaek, S. M. B., & Majidi, N. (2022). *Identifying the Drivers and Propellants of IoT Application in the Management of Iran's Aviation Industry*. Karafan Quarterly Research Journal, 19, 597-618. <https://doi.org/https://doi.org/10.48301/kssa.2022.316253.1870>
- [5] Karimi, H. (2021). *Sensor Node Clustering Algorithm with Respect to Node Density in Wireless Sensor Networks*. Karafan Quarterly Research Journal, 18(3), 253-272. <https://doi.org/https://doi.org/10.48301/kssa.2021.269713.1360>
- [6] Deypir, M., Maarefi, A., & Zoughi, T. (2024). *A Hybrid Multivariate Routing Approach for Improving Efficiency in VANETS*. Karafan Quarterly Research Journal, -. <https://doi.org/http://doi.org/10.48301/kssa.2024.423334.2752>
- [7] Bellalta, B. (2016). *IEEE 802.11 ax: High-efficiency WLANs*. IEEE Wireless Communications, 23(1), 38-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7422404>

- [8] Filoso, D. G., Kubo, R., Hara, K., Tamaki, S., Minami, K., & Tsuji, K. (2020). *Proportional-based resource allocation control with QoS adaptation for IEEE 802.11 ax*. ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), 1-6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149111>
- [9] Mozaffariahrar, E., Theoleyre, F., & Menth, M. (2022). *A survey of Wi-Fi 6: Technologies, advances, and challenges*. Future Internet, 14(10), 293. <https://doi.org/10.3390/fi14100293>
- [10] Ibrahim Masri, E. E., & Ergüzen, A. (2020). *Review Paper on 802.11 ax Scheduling and Resource Allocation*. Int. J. Trend Sci. Res. Dev.(IJTSRD), 5(1), 1134-1139. <https://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd38162.pdf>
- [11] Sharon, O., & Alpert, Y. (2019). *Advanced IEEE 802.11 ax TCP aware scheduling under unreliable channels*. International Journal of Communication Systems, 32(14), e4060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/dac.4060>
- [12] Bankov, D., Didenko, A., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2018). *OFDMA uplink scheduling in IEEE 802.11 ax networks*. 2018 IEEE international conference on communications (ICC), 1-6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422767>
- [13] Magrin, D., Avallone, S., Roy, S., & Zorzi, M. (2023). *Performance Evaluation of 802.11 ax OFDMA through Theoretical Analysis and Simulations*. IEEE Transactions on Wireless Communications, 22(8), 5070-5083. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3231447>
- [14] Yang, M., Li, B., & Yan, Z. (2021). *MAC Technology of IEEE 802.11 ax: Progress and Tutorial*. Mobile Networks and Applications, 26, 1122-1136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11036-020-01622-3>
- [15] Avdotin, E., Bankov, D., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2019). *OFDMA resource allocation for real-time applications in IEEE 802.11 ax networks*. 2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 1-3. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom.2019.8812774>
- [16] Deng, D.-J., Lin, Y.-P., Yang, X., Zhu, J., Li, Y.-B., Luo, J., & Chen, K.-C. (2017). *IEEE 802.11 ax: highly efficient WLANs for intelligent information infrastructure*. IEEE Communications Magazine, 55(12), 52-59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700285>
- [17] Islam, G. Z., & Kashem, M. A. (2022). *Efficient resource allocation in the IEEE 802.11 ax network leveraging OFDMA technology*. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 34(6), 2488-2496. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.10.019>
- [18] Magrin, D., Avallone, S., Roy, S., & Zorzi, M. (2021). *Validation of the ns-3 802.11ax OFDMA implementation*. Proceedings of the 2021 Workshop on ns-3, 1-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/3460797.3460798>
- [19] Bianchi, G. (2000). *Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function*. IEEE Journal on selected areas in communications, 18(3), 535-547. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/49.840210>
- [20] Bellalta, B., & Kosek-Szott, K. (2019). *AP-initiated multi-user transmissions in IEEE 802.11 ax WLANs*. Ad Hoc Networks, 85, 145-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.05397>

- [21] Dovelos, K., & Bellalta, B. (2020). *A scheduling policy for downlink OFDMA in IEEE 802.11 ax with throughput constraints*. arXiv preprint arXiv:2009.00413. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.00413>
- [22] Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., Fortuna, R., & Camarda, P. (2011). *Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in LTE networks*. IEEE Transactions on Multimedia, 13(5), 1052-1065. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TMM.2011.2152381>
- [23] Afaqui, M. S., Garcia-Villegas, E., Lopez-Aguilera, E., Smith, G., & Camps, D. (2015). *Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for IEEE 802.11 ax*. 2015 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC), 1060-1065. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/WCNC.2015.7127616>
- [24] Bankov, D., Didenko, A., Khorov, E., Loginov, V., & Lyakhov, A. (2017). *IEEE 802.11 ax uplink scheduler to minimize, delay: A classic problem with new constraints*. 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 1-5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292382>
- [25] Dovelos, K., & Bellalta, B. (2018). *Optimal resource allocation in IEEE 802.11 ax uplink OFDMA with scheduled access*. arXiv preprint arXiv:1811.00957. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.00957>
- [26] Bhattarai, S., Naik, G., & Park, J.-M. J. (2019). *Uplink resource allocation in IEEE 802.11 ax*. ICC 2019-2019 IEEE international conference on communications (ICC), 1-6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761594>
- [27] Bai, J., Fang, H., Suh, J., Aboul-Magd, O., Au, E., & Wang, X. (2018). *Adaptive uplink OFDMA random access grouping scheme for ultra-dense networks in IEEE 802.11 ax*. 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), 34-39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ICCCChina.2018.8641202>
- [28] Avallone, S., Imputato, P., Redieteb, G., Ghosh, C., & Roy, S. (2021). *Will OFDMA improve the performance of 802.11 WiFi networks?* IEEE Wireless Communications, 28(3), 100-107. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000332>
- [29] Park, H. (2021). *Performance analysis of trigger frame in enhanced UL and DL MU MIMO transmissions*. World Wide Web, 24(5), 1533-1550. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11280-021-00921-3>
- [30] Peng, M., Yin, Q., Zhang, K., & Kai, C. (2023). *Adaptive multi-user uplink resource allocation based on access delay analysis in IEEE 802.11 ax*. Wireless Networks, 29(3), 1223-1235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11276-022-03192-6>
- [31] Henderson, T. R., Lacage, M., Riley, G. F., Dowell, C., & Kopena, J. (2008). *Network simulations with the ns-3 simulator*. SIGCOMM demonstration, 14(14), 527. <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2008/papers/p527-hendersonA.pdf>