



Semnan University



Research Article

## Compliance of Time Sensitive Network Protocol with the Specifications of MIL-STD-1553B Standard for Aviation Applications

Mohammad Ali Abbasi <sup>a</sup>, Fakhroddin Nazari <sup>a,\*</sup>, Rasoul Hajizadeh <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran

### PAPER INFO

#### **Paper history:**

Received: 2023-10-21

Revised: 2024-06-08

Accepted: 2024-08-21

#### **Keywords:**

Data bus;  
Aviation systems;  
Time sensitive network.

### ABSTRACT

In this article, the time-sensitive networking protocol on the MIL-STD-1553 data bus is implemented and evaluated to reduce the average packet reception delay. The most important feature of this bus is its high reliability. One of the parameters addressed in this bus is the certainty of data arrival along with the defined delay, meaning the bus is designed in a way that the probability of creating delays beyond the standard does not exist. However, despite all the good properties of this bus, its low speed is not suitable for modern systems today. In this article, the delay issue and its guarantee based on time-sensitive networking are examined. The proposed method prioritizes packets exchanged in the 1553 data bus. OMNET++ software is used for implementation, and simulation results show that delays have been less compared to the 1553 bus, and while the size of these delays remains constant, their amount is almost constant under conditions where there is an increase in data volume and its transfer rate. The proposed time-sensitive protocol reduces the average maximum network delay by 86 percent.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32112.2546>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author.

E-mail address: [nazari@ausmt.ac.ir](mailto:nazari@ausmt.ac.ir)

#### **How to cite this article:**

Nazari, F., Hajizadeh, R., & Abbasi, M. (2024). Compliance of Time Sensitive Network Protocol with the Specifications of MIL-STD-1553B Standard for Aviation Applications. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(79), 99-108. doi: 10.22075/jme.2024.32112.2546

## مطابقت پروتکل شبکه حساس به زمان با مشخصات استاندارد MIL-STD-1553B برای کاربردهای هوایی

محمدعلی عباسی<sup>۱</sup>، فخرالدین نظری<sup>۱\*</sup>، رسول حاجی زاده<sup>۱</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹	در این مقاله، پروتکل شبکه‌های حساس به زمان در بستر گذرگاه داده MIL-STD-1553 پیاده سازی و ارزیابی شده است تا متوسط تاخیر در دریافت بسته‌ها کاهش یابد. مهمترین خصوصیت این گذرگاه قابلیت اطمینان بالای آن است. یکی از پارامترهای مطرح در این گذرگاه، قطعیت در رسیدن داده‌ها همراه با تاخیر تعریف شده است، یعنی گذرگاه به گونه‌ای طراحی شده که احتمال ایجاد تاخیرهای خارج از استاندارد وجود ندارد. اما با وجود تمامی خصوصیت‌های خوب این گذرگاه، امروزه سرعت پایین آن جوابگوی سیستم‌های نوین نیست. در این مقاله، مسئله تاخیر و تضمین آن مبتنی بر شبکه حساس به زمان مورد بررسی قرار داده می‌شود. روش پیشنهادی، به اولویت دهی به بسته‌هایی می‌پردازد که در گذرگاه داده ۱۵۵۳ مبادله می‌گردند. برای پیاده سازی از نرم افزار OMNET++ استفاده شده و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تاخیرها نسبت به گذرگاه ۱۵۵۳ کمتر بوده و ضمن ثابت بودن اندازه این تاخیرها، میزان آنها در شرایطی که همراه با افزایش حجم داده‌ها و نرخ انتقال آنها است، تقریباً ثابت است. پروتکل حساس به زمان پیشنهادی به طور متوسط ۸۶ درصد ماکزیمم تاخیر در شبکه را کاهش می‌دهد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱	
<b>واژگان کلیدی:</b> گذرگاه داده، سیستم‌های هوانوردی، شبکه حساس به زمان.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32112.2546>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### ۱- مقدمه

ابتدا جهت برقراری و انتقال اطلاعات در سیستم‌های هوایی، توسط ایالات متحده آمریکا پیاده‌سازی گردید و پس از سال‌ها کارکرد و تایید قابلیت‌های آن، در مکان‌های حساس نیز استفاده شده است [۱-۳]. در یک هواپیما و به خصوص هواپیمای با مأموریت جنگی، که نیاز به دقت و سرعت عمل بالایی دارد، کوچکترین تاخیری در دریافت، ارسال و یا پردازش داده‌ها می‌تواند باعث مختل شدن مأموریت و یا حتی به شکست کشیده شدن آن شود. با توجه به سرعت بالای این گونه هواپیماها، سیستم‌های آنها باید از الزامات و استانداردهای مشخص و ویژه‌ای برخوردار باشند. تمرکز این استانداردها بر قابلیت اطمینان بالای گذرگاه‌های ارتباطی، در شرایط

امروزه برقراری ارتباط و تبادل اطلاعات مابین زیرسیستم‌های دارای حساسیت بالا، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، به طوری که هرگونه خطا و یا اشتباهی منجر به ایجاد صدمات و خسارات جبران‌ناپذیری می‌گردد. از جمله این ارتباطات می‌توان به ارتباط بین سیستم‌ها در نیروگاه‌های هسته‌ای، هواپیماهای نظامی، ناوها، سکوها نفتی و... اشاره نمود. این گونه ارتباطات، از استانداردها و چهارچوب‌های سخت‌گیرانه‌ای برخوردارند تا کوچکترین خطایی در تبادل اطلاعات رخ ندهد. یکی از این بسترهای ارتباطی مهم، که در ابتدا برای محصولات هوایی نظامی کاربرد داشته، گذرگاه داده MIL-STD-1553 است. این گذرگاه

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: nazari@ausmt.ac.ir

۱. دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل، آمل، ایران

استناد به این مقاله:

تنوع در شبکه‌های ارتباطاتی شده و همین امر موجب پیچیدگی سیستم‌ها گردیده و نیازمند عیب‌یابی غیر یکپارچه است [۷].

سخت‌گیری‌های داخل استاندارد باعث شده برای جلوگیری از خطاء سخت‌افزارهای آن دارای محدودیت سرعت شوند به همین دلیل هر گونه افزایش سرعت انتقال داده، سخت افزارهای آنرا دچار چالش‌ها و محدودیت‌های فراوانی نموده است. این گذرگاه بسیار قابل اعتماد بوده، به همین دلیل با وجود سرعت انتقال پایین آن همچنان مورد استفاده بوده و بیشتر برای داده‌های حساس و مهم که نباید خطایی در آنها رخ بدهد استفاده می‌گردد. بنابراین، برای ایجاد یکپارچه‌سازی و افزایش سرعت در ارتباطات مهم، باید ابتدا بتوان قابلیت اطمینانی که برای داده‌های حساس گذرگاه ۱۵۵۳ وجود دارد را ایجاد نمود و همزمان سرعت انتقال داده افزایش یابد. با بررسی‌های انجام شده شبکه حساس به زمان<sup>۳</sup> (TSN) دارای چنین قابلیت‌هایی بوده که برای هر داده‌ای در شبکه اولویت قائل می‌شود. در این مقاله، ما به دنبال ایجاد مطابقت پروتکل شبکه‌های حساس به زمان با گذرگاه داده ۱۵۵۳ هستیم تا ضمن حفظ قابلیت اطمینان بالا، سرعت انتقال داده‌ها را افزایش دهیم.

در ادامه، ابتدا به معرفی گذرگاه داده ۱۵۵۳ پرداخته خواهد شد. سپس در بخش ۳، روش پیشنهادی جهت تطبیق پروتکل شبکه‌های حساس به زمان با گذرگاه داده ۱۵۵۳ بیان می‌شود. قابلیت اطمینان بالای گذرگاه ۱۵۵۳ و پیاده‌سازی بسیار گسترده آن در مکانهای حساس باعث شد برای رسیدن به یک شبکه ارتباطی قابل اعتماد با سرعت انتقال بالا، از گذرگاه ۱۵۵۳ به عنوان مبنای مقایسه با شبکه حساس به زمان استفاده گردد. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی بیان و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در انتها نیز به جمع‌بندی مقاله در بخش ۵ پرداخته شده است.

## ۲- گذرگاه داده ۱۵۵۳

گذرگاه داده ۱۵۵۳، یک گذرگاه نیمه دوطرفه است و در هر لحظه تنها یک فرستنده می‌تواند درگاه را جهت ارسال داده در اختیار بگیرد. با توجه به نیمه دو طرفه بودن گذرگاه ۱۵۵۳، در هر لحظه یک سیستم قادر به گذاشتن داده بر روی گذرگاه بوده و همزمان یک یا چند سیستم قادر به برداشتن داده از روی آن هستند. این خصوصیت باعث

سخت‌گیرانه، باعث افزایش بسیار زیاد هزینه‌های ساخت، تعمیر و نگهداری این سیستم‌ها می‌شود. یکی از موارد بسیار مهمی که همیشه مد نظر بوده نحوه و چگونگی ارتباط بین این سیستم‌ها در هواپیماها است. استانداردهای بسیار متفاوتی تاکنون ارائه شده و بعضاً مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از این ارتباطات با قابلیت اطمینان بالا، استاندارد MIL-STD-1553 است. این استاندارد را ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۰ برای ایجاد ارتباط با قابلیت اطمینان بالا بین سیستم‌های اویونیک‌های هواپیماهای نظامی خود طراحی و پیاده‌سازی نموده و سپس در اکثر هواپیماها به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۴].

جهت افزایش سرعت در ارتباطات مهم، طراحی‌هایی انجام و حتی پیاده‌سازی صورت گرفت. اما به دلیل اینکه آنها برای نیاز خاصی طراحی شده‌اند، و قابلیت اطمینان موجود در گذرگاه ۱۵۵۳ را نمی‌توانند برآورده سازند؛ کاربرد وسیع‌تر آنها را با مشکل مواجه نمود. از جمله این ارتباطات می‌توان گذرگاه AFDX<sup>۱</sup> را نام برد که برای کاربردهای هوایی مسافری در نظر گرفته شده است [۵]. AFDX مبتنی بر شبکه اترنت بوده و در آن از هندسه ستاره استفاده شده است. این شبکه برای کاربردهای تجاری، از نوع هوایی- مسافرتی، طراحی گردیده و با وجود داشتن نرخ انتقال بالا، از قابلیت اطمینان موجود در گذرگاه داده ۱۵۵۳ برخوردار نیست. گذرگاه دیگری که مورد استفاده قرار گرفته است، گذرگاه داده ARINC 429<sup>۲</sup> است که به صورت گسترده در بوئینگ ۷۵۷ و ۷۶۷ و همچنین ایرباس A300/A310 است که در اواخر ۱۹۷۰ و اوایل ۱۹۸۰ استفاده شده است [۶]. پیاده‌سازی فیزیکی گذرگاه داده A429 از زوج سیم به هم تابیده و محافظت شده در دو طرف و انشعابات وسط، تشکیل شده است. نرخ ارسال اطلاعات در حالت سرعت پایین ۱۲-۱۴ کیلوبایت بر ثانیه و در حالت سرعت بالا ۱۰۰ کیلوبایت بر ثانیه می‌باشد و این یعنی مشکل سرعت در این گذرگاه همچنان پابرجا است. در هواپیماهای جدید و غیر تجاری، از روش‌های خاص و به صورت ترکیبی، جهت رفع مشکل نرخ انتقال بهره گرفته شده است. به عنوان مثال، از فیبر نوری برای سیستم‌هایی که تبادل داده زیادتری دارند استفاده شده و از گذرگاه ۱۵۵۳ صرفاً برای انتقال داده‌های حساس و با نرخ پایین استفاده می‌شود. این کار باعث ایجاد

<sup>3</sup> Time Sensitive Network

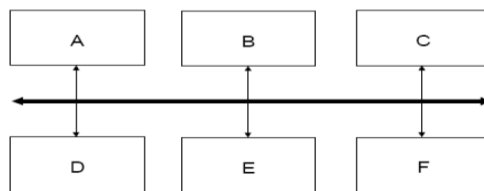
<sup>1</sup> Avionics Full-Duplex Switched Ethernet

<sup>2</sup> Aeronautical Radio Inc

کلمه وضعیت. همانطور که در شکل (۲) مشخص است طول هر کلمه در گذرگاه ۱۵۵۳ برابر ۲۰ بیت است و سه بیت اول هر کلمه بیت همسان سازی است. همچنین ۱۶ بیت بعدی برای اطلاعات هستند و بیت آخر به عنوان بیت تعادل است. کنترلر گذرگاه ۱۵۵۳ همانند فرمانده یک میدان بوده که هیچ فردی بدون اجازه او حق صحبت کردن یا تبادل اطلاعات را ندارد. بر اساس استاندارد، کنترلر گذرگاه بعد از انتقال بسته‌ها بر روی گذرگاه و با توجه به آگاهی از حجم و نوع داده‌ی عبوری از آن، به مدت زمان طول بسته به اضافه‌ی ۱۴ میکروثانیه منتظر مانده و چنانچه در این مدت زمان، پیام پاسخ دریافت کننده پیام دریافت نشود، مطابق تعاریف مشخص شده در استاندارد، کنترلر گذرگاه اعلام بروز خطا نموده و درخواست ارسال دوباره پیام را می‌نماید. این درخواست می‌تواند چندین بار از طریق گذرگاه پشتیبان هم ارسال گردد و در صورت عدم دریافت پاسخ از هر دو گذرگاه با توجه به باس لیست تعریف شده توسط طراح، خطای رخ داده شده را به اطلاع کاربر (خلبان) می‌رساند [۴].

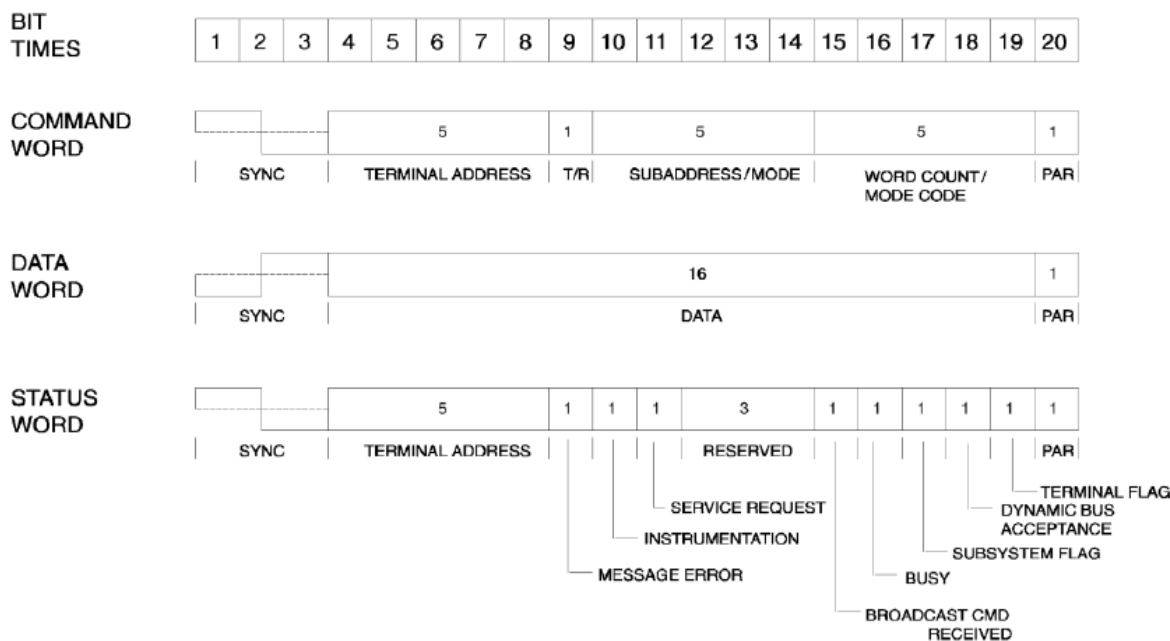
مشکل اساسی ۱۵۵۳ فقط داشتن نرخ انتقال داده پایین است. در این مقاله، با حفظ الزامات گذرگاه در استاندارد، سعی در رفع این مشکل با استفاده از شبکه حساس به زمان شده است. برای این منظور پس از بررسی مشخصات گذرگاه ۱۵۵۳، مشخصاتی مانند انواع پیام‌ها و بسته‌های داده‌ای که بر روی گذرگاه مبادله می‌شوند مورد مطالعه قرار گرفته است.

افزایش دقت گذرگاه شده و اینکه تصادم بر روی گذرگاه به هیچ وجه اتفاق نمی‌افتد. همچنین، هیچگاه داده‌ها در صف قرار نمی‌گیرند که باعث بلادرنگ شدن گذرگاه و عدم ایجاد تاخیر شده و داده‌ها سر یک زمان خاص و مورد انتظار به مقصد می‌رسند [۴]. این گذرگاه به دلیل طراحی منحصر به فرد در لایه فیزیکی و استفاده از قطعات الکترونیکی با الزامات هوایی و پیاده‌سازی دو عدد گذرگاه به طور همزمان (گذرگاه پشتیبان) یک گذرگاه داده با قابلیت اطمینان بالا بوده که در اکثر هواپیماهای نظامی و نیروگاه‌های هسته‌ای یا سکوی نفتی که دارای حساسیت زیادی هستند استفاده شده است. در شکل (۱)، نحوه ارتباط سیستم‌ها نمایش داده شد. همانطور که در شکل مشخص است هر سیستم به طور مجزا به گذرگاه (خط مشکی پررنگ) متصل است.



شکل ۱- نحوه اتصال سیستم‌ها به گذرگاه.

همچنین در شکل (۲)، انواع پیام‌هایی که جهت ارتباط و مبادله داده بروی گذرگاه ۱۵۵۳ مورد استفاده قرار می‌گیرند نشان داده شده است. در استاندارد به صراحت سه نوع کلمه تعریف شده است که عبارتند از کلمه فرمان، کلمه داده،



شکل ۲- انواع کلمات در گذرگاه ۱۵۵۳ [۴]

این استاندارد مربوط به تاخیرهای کم، محدود و مشخص است که برای کاهش زمان بلوک شدن مسیر حرکت بسته ها در شبکه است. با ترکیب استاندارد لایه فیزیکی IEEE 802.3br امکان ارسال قالب‌های اولویت‌دار در بین قالب های <sup>1</sup>BE را فراهم می‌کند.

- استاندارد IEEE 802.1Qca

این استاندارد نحوه رزرو و کنترل مسیر را در سوئیچ‌های شبکه TSN انجام داده و بر اساس پروتکل وضعیت لینک ارتباطی، پیاده‌سازی می‌شود.

- استاندارد IEEE 802.1Qci

در صورتی که ایستگاه‌های پایانی قادر به پیاده‌سازی قابلیت های استاندارد IEEE802.1CB نباشند استاندارد IEEE802.1Qci جهت بهبود قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار گرفته است. این استاندارد، نظارت بر جریان، تشخیص خطا و کاهش خطا را با مسدود کردن یک دستگاه برای ممانعت از انتشار جریان داده در شبکه مدیریت می‌کند.

از طرفی، باید توجه داشت که صف‌های ترافیک در شبکه TSN به ۸ صف تقسیم شده‌اند که صف صفر مختص ترافیک BE بوده و پایین‌ترین اولویت را داشته و صف‌های یک و دو برای AVB<sup>2</sup> و همچنین صف‌های ۳ تا ۷ برای ترافیک TT<sup>3</sup> بوده که دارای بالاترین اولویت بوده و از همه، صف ۷ بیشترین اولویت را از نظر سوئیچ‌های شبکه دارد [۸ و ۹].

ترافیک BE: این ترافیک دارای کمترین اولویت بوده و برای کاربردهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هیچ الزام زمانبندی در آنها وجود ندارد.

ترافیک AVB: این ترافیک برای برنامه‌هایی است که به تاخیر انتها به انتها نیازمند بوده ولی در عین حال دارای اولویت خیلی کمتری نسبت به ترافیک TT هستند و این ترافیک به دو زیرگروه AVB کلاس A (Audio) و AVB کلاس B (Video) با تاخیرهای انتها به انتهای محدود تقسیم می‌شوند.

ترافیک TT: ترافیک TT برای داده‌های با اولویت خیلی بالا و بلادرنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای کمترین تاخیر و جیتر تاخیر می‌باشند.

### - گذرگاه ۱۵۵۳ مبتنی بر TSN

برای تطبیق شبکه حساس به زمان با مشخصات گذرگاه ۱۵۵۳ مسئله تضمین تاخیر داده‌های مهم مورد بررسی قرار

### ۳- روش پیشنهادی: پیاده‌سازی الزامات انتقال داده گذرگاه ۱۵۵۳ با استفاده از پروتکل‌های شبکه حساس به زمان

روش پیشنهادی در این مقاله، برای تطبیق شبکه حساس به زمان با گذرگاه ۱۵۵۳ بوده به گونه‌ای که حداقل تاخیر بر اساس استاندارد ۱۵۵۳ را تضمین نماید. در ادامه، شبکه حساس به زمان و نحوه تطبیق آن با گذرگاه ۱۵۵۳ بیان می‌گردد.

### ۳-۱- استانداردها و انواع صف‌های شبکه حساس به زمان

استانداردها و پروتکل‌های شبکه TSN به شرح زیر است:

- IEEE802.1Qbv- Time Aware Shaping
- IEEE 802.1Qbu and IEEE 802.3br- Pre-emption
- IEEE 802.1Qca- Path Control and Reservation
- IEEE 802.1Qcc- Stream Reservation protocol
- IEEE 802.1Qci- Per stream filtering and policing
- IEEE 802.1QCB- frame replication and elimination
- IEEE 802.1Qch- Cyclic frequency and forwarding
- IEEE 802.1AS- Enhanced generic Precision Time Protocol

با توجه به گسترده بودن آنها و اینکه هر کدام از این استانداردها دارای کتابچه و تعاریف خودش است، در اینجا درباره تعدادی از آنها به صورت خلاصه اشاره شده است.

- استاندارد IEEE802.1Qbv

Time Aware Shaper (IEEE802.1Qbv) (TAS) برای باز کردن دروازه‌ها در زمان مورد نیاز استفاده می‌شود. کاربرد می‌تواند نحوه عملکرد گیت‌ها را پیکربندی کند. بدون Time-Aware Scheduler، یک ترافیک با اولویت پایین می‌تواند باعث تأخیر ترافیک با اولویت بالا در سراسر یک سوئیچ اترنت یا یک مسیر ارتباطی شبکه شود. TAS با زمان‌بندی پهنای باند شبکه برای قالب‌ها و اطلاعات با اولویت‌های مختلف، سعی می‌کند همیشه قالب‌های با اولویت بالاتر، سریع‌تر در شبکه حرکت کنند و قالب‌های بزرگ‌تر مانعی بر سر راه قالب‌های کوچک‌تر نشوند.

- استاندارد IEEE 802.1Qbu

<sup>3</sup> Time-triggered traffic

<sup>1</sup> Best Effort

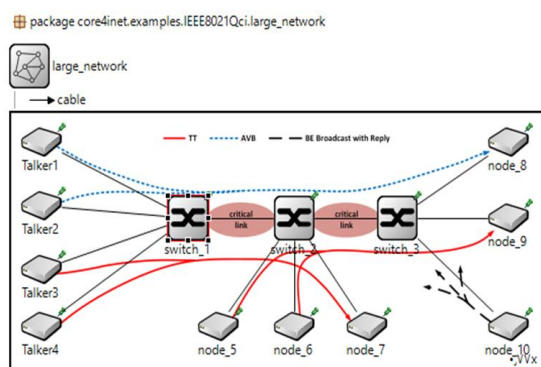
<sup>2</sup> Audio Video Bridging

زبان در این نرم افزار است کلیه کتابخانه‌های مورد نظر را براساس استانداردهای و پروتکل‌های تعیین شده ایجاد نموده و سپس در اجرای شبیه‌سازی‌ها از آنها استفاده نمود. روش دوم هم با توجه به منبع باز بودن این نرم افزار، استفاده از کتابخانه‌های موجود در آن و یا توسط دیگران است. با توجه به زمان بر بودن پیاده‌سازی استانداردهای شبکه TSN و همچنین نهایی نشدن همه آنها، در حال حاضر مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی به صورت گزینشی با توجه به تحقیقات مورد نظر خود جهت استفاده از یک یا چند استاندارد از شبکه TSN کتابخانه‌هایی را ایجاد نموده که از آن جمله می‌توان به کتابخانه منبع باز CoRE4INET اشاره نمود [۱۴ و ۱۵].

جدول ۱- مشخصات پردازشگر استفاده شده برای شبیه‌سازی

OS	Microsoft Windows 10 Professional
CPU	Core i9 , 3.2Ghz
RAM	16G , DDR4

از جمله استانداردهایی که این کتابخانه منبع باز پشتیبانی می‌نماید می‌توان به IEEE 802.1Qci، IEEE 802.1Qbv، IEEE 802.1Qca اشاره نمود. اجرای اولویت بندی به داده‌ها توسط این کتابخانه اجرا می‌شود. همچنین در محیطی کاملاً گرافیکی می‌توان به تنظیم اولویت داده‌ها، حجم آنها، سرعت ارسال آنها، فاصله سیستم‌ها از سوئیچ و ... پرداخت. چون در اکثر هواپیماها فاصله سیستم‌ها از یکدیگر از چندین متر تجاوز نمی‌کند می‌توان اشاره داشت که فاصله بین سیستم‌ها در تاخیر انتها به انتهای داده‌ها تاثیر چندانی ندارد. البته، در شبیه‌سازی باید این فاصله‌ها ذکر و تنظیم شوند. در شکل‌های (۳) تا (۵) محیط و ساختار گرافیکی شبکه در بستر ++ OMNET نشان داده شده است.



شکل ۳- محیط گرافیکی سوئیچ‌ها و سیستم‌ها در OMNET++

داده شده است. برای این کار اولویت داده با حجم بیشتر از داده با حجم کمتر بالاتر در نظر گرفته شده است. در حالت عادی انتظار این است که داده با حجم بالاتر تاخیر بیشتری داشته باشد ولی در این جا نشان داده شده که بر خلاف تصور، داده‌های با اولویت بالا و حجم بیشتر کمترین تاخیر را داشته و زودتر به مقصد رسیده‌اند. در ابتدا بر اساس اندازه بزرگترین بسته در گذرگاه ۱۵۵۳ (۶۴۰ بیت) تعدادی بسته داده با اندازه بیشتر از ۶۴۰ بیت در نظر گرفته و سپس این داده‌ها بر اساس اولویت‌های تعریف شده در شبکه حساس به زمان، اولویت‌دهی شدند. در اینجا یک بار با ثابت نگه داشتن نرخ ارسال و سپس هر بار افزایش تعداد بسته‌ها تاخیر داده‌ها در شبکه مورد بررسی قرار داده شد و یک بار با ثابت نگه داشتن تعداد بسته‌ها و افزایش نرخ ارسال بسته‌ها، در هر دو روش تاخیر بوجود آمده کمتر از گذرگاه ۱۵۵۳ بوده است.

#### ۴- شبیه‌سازی و بررسی نتایج

در این مطالعه، شبیه‌سازی‌ها در بستر نرم‌افزار ++OMNET صورت گرفته است. ++OMNET مخفف Objective Modular Network است و مبتنی بر ++C بوده و همچنین دارای یک محیط نرم افزاری است که اکثر شرکت‌ها و تیم‌های پژوهشی، دانشجویان و محققین حوزه شبکه برای مدل‌سازی، شبیه‌سازی، تحلیل، ارزیابی کارایی شبکه و پروتکل‌ها از آن استفاده می‌کنند [۱۰]. OMNET یک شبیه‌ساز شی‌گرا بوده و از دسته نرم‌افزارهای رویداد گسسته است [۱۱]. کاربرد اصلی نرم افزار ++OMNET شبیه‌سازی شبکه‌های سیمی و بیسیم است و با پشتیبانی از شبکه‌های ادهاک بیس (Wireless Ad Hoc Networks)، شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN)، شبکه‌های MANET، شبکه بین خودروبی (VANET)، شبکه‌های نوری (Photonic Networks)، پروتکل و استانداردهای متنوع شبکه و ... محبوبیت مطلوبی را در مقایسه با نرم افزارهای مشابه شبیه‌ساز شبکه نظیر NS2، NS3، OPNet، QualNET، GloMoSIM، JSIM و ... به خود اختصاص داده است [۱۲ و ۱۳].

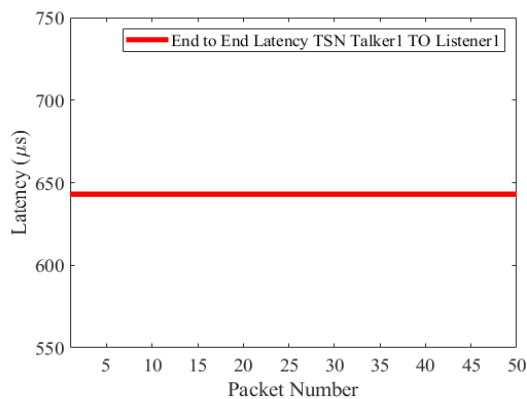
در این تحقیق سیستم عامل مورد استفاده Windows 10 بوده و مشخصات اصلی سخت افزاری که شبیه‌سازی‌ها بر روی آن اجرا شده‌اند به صورت جدول ۱ است.

برای شبیه‌سازی با این نرم‌افزار می‌توان به دو روش عمل نمود. در روش اول برنامه نویسی به زبان ++C که مهمترین

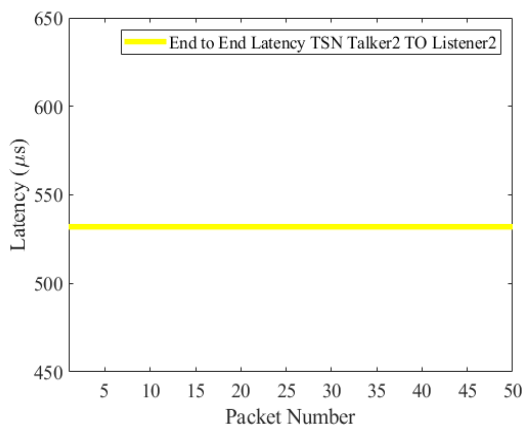
جدول ۲- مقادیر داده‌های مورد آزمایش برای گذرگاه ۱۵۵۳ و

شبکه TSN

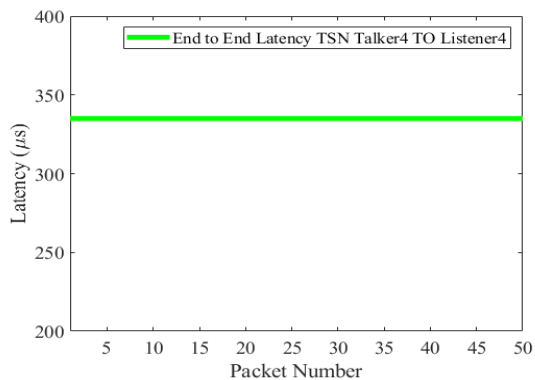
	DATA Word Size in Bus 1553	Packet Size Per Bit	Latency In Bus 1553 With 14 us	Distance To Switch/ meter	Priority
Talker1	100	800	814	5m	4
Talker2	150	1200	1214	10m	5
Talker3	200	1600	1614	20m	6
Talker4	300	2400	2414	30m	7
BE Traffic	1500	12000	12014	10m	0



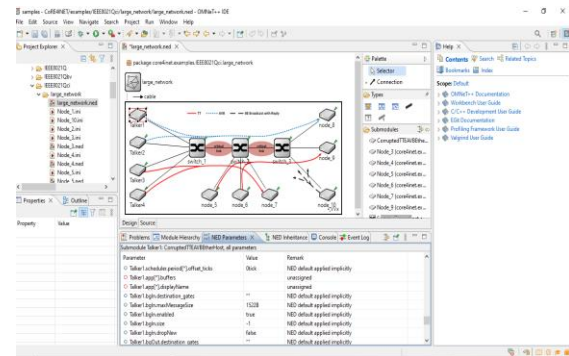
شکل ۶- تاخیر TSN Talker-1 بر اساس افزایش بسته‌ها.



شکل ۷- تاخیر TSN Talker-2 بر اساس افزایش بسته‌ها.



شکل ۸- تاخیر TSN Talker-3 بر اساس افزایش بسته‌ها



شکل ۴- محیط نرم افزار OMNET++ و سوئیچ‌های TSN

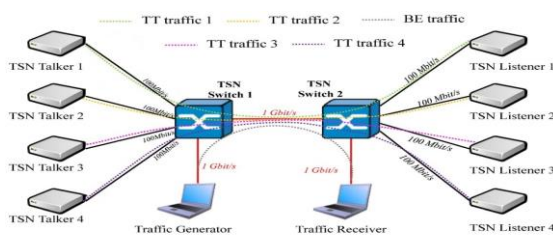
Parameter	Value	Remark
switch2.phy["shaper.queue"].destination_gates	**	NED default applied implicitly
switch2.phy["shaper.queue"].maxMessageSize	1522B	NED default applied implicitly
switch2.phy["shaper.queue"].enabled	true	NED default applied implicitly
switch2.phy["shaper.queue"].size	-1	NED default applied implicitly
switch2.phy["shaper.queue"].dropNew	false	NED default applied implicitly
switch2.phy["shaper.transmissionSelectionAlgor...	"o"	NED default applied implicitly
switch2.phy["shaper.transmissionGate"].state	"o"	NED default applied implicitly
switch2.phy["shaper.transmissionSelection.num...	numPCP	NED
switch2.phy["shaper.gateControlList.numGates	numPCP	NED

شکل ۵- محیط NED برای تنظیم پارامترهای عناصر شبکه

در گذرگاه داده ۱۵۵۳ شبکه حساس به زمان پیشنهادی، ابتدا با ثابت نگه داشتن نرخ ارسال، با هر بار افزایش ارسال تعداد بسته‌ها، تغییرات تاخیر به صورت نمودار استخراج و مشاهده شد که با افزایش تعداد بسته‌ها، تاخیر در شبکه همچنان ثابت مانده است. نتایج آزمایش در سناریوی اول در شکل‌های (۶) تا (۹) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با اینکه تعداد بسته‌های نمودار دوم بیشتر از اولی است تاخیر کمتری نسبت به اولی دارد و این به خاطر داشتن اولویت بالاتر از نظر شبکه است. مطابق جدول ۲ اولویت ۵ بالاتر از اولویت ۴ بوده و با اینکه حجم داده بالاتری دارد به نسبت در شبکه تاخیر بسیار کمتری برای آن ایجاد گردید. در سناریوی دیگر، تضمین تاخیر مورد آزمایش قرار گرفته و همانطور که قبلاً هم ذکر شد این بار حجم داده‌ها را مطابق جدول ۲ ثابت نگه داشته و تاثیر افزایش نرخ ارسال را بر روی داده‌های شبکه و تاخیر آنها مورد بررسی قرار داده شد که مجدداً میزان تاخیر ثابت باقی ماند. با توجه به هر دو روش آزمایش صورت گرفته، ملاحظه شد که افزایش یا کاهش این دو پارامتر در بازه تعریف شده تاثیری بر تاخیرهای شبکه نخواهد داشت و می‌توان چنین نتیجه گرفت که در کنار افزایش سرعت در شبکه حساس به زمان، حداکثر تاخیرهای مورد انتظار در گذرگاه ۱۵۵۳ قابل حصول است. نتایج سناریوی دوم در شکل (۱۰) هم به همین ترتیب نشان داده شده است.

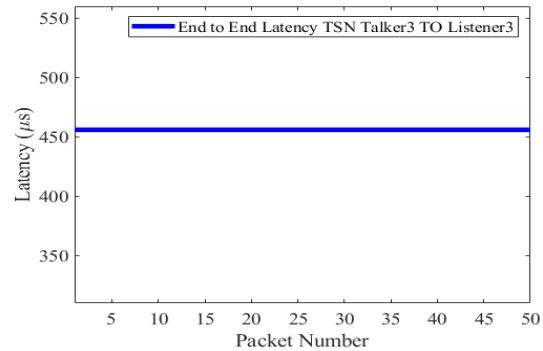
بندی داده‌ها (TAS)، که توسط استاندارد IEEE 802.1Qbv مشخص گردیده و در کتابخانه CoRE4INET پیاده‌سازی شده، در نظر گرفته شد. برای این کار، ۴ سیستم را به عنوان فرستنده یا گوینده<sup>۱</sup> و ۴ سیستم را به عنوان گیرنده یا شنونده در نظر گرفته شد و هر کدام از سیستم‌ها دارای اولویت تعریف شده و اندازه داده متفاوت هستند (بالاترین اولویت برای داده با حجم بالا و کمترین اولویت برای داده با حجم پایین). طی یک بازه زمانی ثابت و اولویت‌های تعریف شده هر بار تعداد بسته‌ها را در شبکه TSN افزایش داده (مطابق جدول ۲ اولویت‌های ۴ تا ۷)، همچنین نمودار تاخیر شبکه را برای هر سیستم به صورت مجزا فقط با وجود ترافیک BE استخراج شده است. برای تضمین این تاخیر در شبکه، مجدداً تاخیر کل سیستم‌ها را در شبکه با ثابت نگه داشتن اندازه بسته‌ها ولی این بار افزایش نرخ ارسال آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار داده در نهایت نتایج هر دو آزمایش که در شکل (۱۰) و جدول ۳ نشان داده شده است را با هم مقایسه کرده و تاخیر حاصل شده در شبکه TSN، با گذرگاه ۱۵۵۳ مطابقت داده شده است.

جدول ۲ مشخصات بسته‌های داده مورد آزمایش را نشان می‌دهد. در شکل (۱۱) ارتباطات و چیدمان سیستم‌ها نشان داده شده است. ارتباط بین فرستنده‌ها تا سوئیچ برابر ۱۰۰ مگا بیت بر ثانیه در نظر گرفته شد، که برای سیستم‌های هوایی سرعتی قابل قبول بوده ولی ارتباط بین تولیدکننده ترافیک و سوئیچ‌ها و ارتباط سوئیچ ۱ و ۲ برابر ۱ گیگابایت بر ثانیه در نظر گرفته شد.

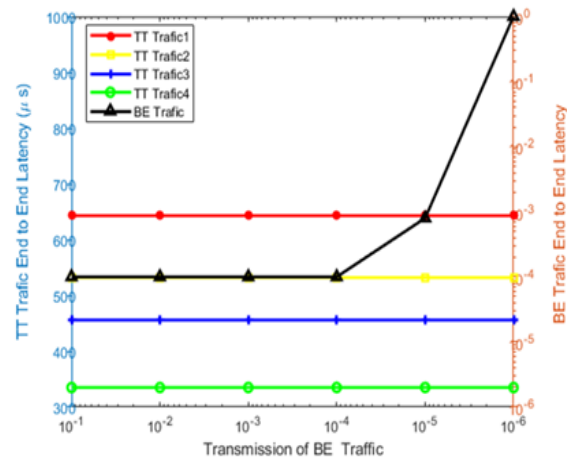


شکل ۱۱- طرح کامل ارتباطات و جریان‌های داده‌ای

TSN Talker 1 از نظر اولویت داده‌ای در دسته ترافیک‌های TT تنظیم گردیده است و اولویت ۴ را که کمترین اولویت در خانواده ترافیک TT می‌باشد را دارا است [۵] و [۱۶]. اندازه داده آن برابر ۱۰۰ بایت داده یعنی ۸۰۰ بیت در نظر گرفته شد. در آزمایش سناریوی اول، با ثابت نگه داشتن نرخ ارسال



شکل ۹- تاخیر TSN Talker-4 بر اساس افزایش بسته‌ها



شکل ۱۰- جریان داده‌های شبکه TSN به همراه ترافیک BE

همانطور که قبلاً اشاره شد در گذرگاه ۱۵۵۳ برای اعتبار سنجی توسط کنترلر گذرگاه به جهت رسیدن داده‌ها به مقصد حداکثر تاخیر برابر ۱۴ میکرو ثانیه به اضافه طول بسته است [۴]. همچنین با توجه به مشخصات گذرگاه داده ۱۵۵۳ (براساس استاندارد که حداکثر طول یک بسته ۶۴۰ بیت است) و سرعت انتقال داده‌ها بروی آن می‌توان گفت که هر بیت برای انتقال به مقصد به مدت یک میکروثانیه زمان نیاز دارد. حال با دانستن اندازه بسته‌ها در این گذرگاه و حداکثر تاخیر مجاز می‌توان مدت زمان مجاز انتقال یک بسته را بدست آورد. در اینجا برای مطابقت شبکه TSN با گذرگاه ۱۵۵۳، در ابتدا مدت زمان انتقال یک بسته را به همراه حداکثر تاخیر مبنا قرار داده شده، و ثابت شد که تحت شرایط سخت همانطور که در گذرگاه ۱۵۵۳ داده‌ای از بین نمی‌رود و اطلاعات در زمان مجاز به همراه تاخیر تعریف شده به مقصد می‌رسند در شبکه TSN هم همین اتفاق، خواهد افتاد. سپس نتایج بدست آمده در این حالت، با نتایج واقعی در استاندارد در جدول ۳ مقایسه شده است. همچنین برای تضمین تاخیر در شبکه TSN پروتکل الویت

<sup>۱</sup> Talker



تاخیر ترافیک BE شروع به افزایش نموده است که این خود نشان می‌دهد که شبکه TSN می‌تواند در یک بازه قابل قبول که توسط کاربر برنامه ریزی می‌شود تمامی ترافیک‌ها را با تضمین بالا به مقصد برساند.

جدول ۳ نشان می‌دهد در شبکه TSN بدون توجه به حجم بسته‌ها، پهنای باند شبکه فقط به صورت اولویت بندی شده اختصاص می‌یابد. یعنی هر چه اولویت بالاتر برود شبکه تا رسیدن به تاخیر قابل قبول، پهنای باند را به ترافیک با اولویت بالاتر اختصاص می‌دهد. مثلاً در اینجا با توجه به اینکه حجم داده Talker4 از همه بیشتر بوده ولی تاخیر زمانی کمتری نسبت به دیگران دارد و برای بقیه اولویت‌ها هم همین موضوع صادق می‌باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به پیاده‌سازی گذرگاه داده ۱۵۵۳ مبتنی بر شبکه حساس به زمان پرداخته شده است. از معایب گذرگاه ۱۵۵۳، ضعف آن در برابر داده‌های با حجم بالا است که موجب تاخیر بالایی خواهد شد. شبکه حساس به زمان می‌تواند حداکثر تاخیرها در استاندارد گذرگاه ۱۵۵۳ را بر آورده نموده و برای داده‌های مهم، اولویت قائل شده و هر چه اولویت داده‌ها بالاتر باشد با اختصاص پهنای باند بالاتر به آنها باعث کمتر شدن تاخیر در رسیدن آنها گردد. نتایج نشان داد که شبکه حساس به زمان عملکرد خیلی خوبی در زمینه سرعت و تاخیر نسبت به گذرگاه ۱۵۵۳ دارد. اما در گذرگاه ۱۵۵۳ چند پارامتر دیگر باعث افزایش قابلیت اطمینان شده بود و تنها تضمین تاخیرها کافی نبوده و به طور مثال باید سخت افزار شبکه حساس به زمان را نسبت به سخت افزار گذرگاه ۱۵۵۳، از نظر تست‌های محیطی مورد سنجش قرار داد. چرا که این گذرگاه تمامی شرایط بد محیطی مد نظر در کاربردهای هوایی را پشت سر گذاشته و در تمامی آنها عملکرد آن دچار نقص نشده است. در اینجا اصلی‌ترین پارامتر در گذرگاه ۱۵۵۳ مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد که پروتکل TSN پیشنهادی به طور متوسط ۸۶ درصد ماکزیمم تاخیر در شبکه را کاهش می‌دهد. بنابراین در صورت رعایت شدن الزامات سخت افزاری در شبکه حساس به زمان همانند آنچه در استاندارد ۱۵۵۳ تعریف شده، به طور یقین می‌توان از این شبکه به عنوان جایگزینی برای گذرگاه ۱۵۵۳ استفاده نمود با این تفاوت که مشکل سرعت در این شبکه رفع شده است.

(10ms)، با هر بار افزایش ارسال تعداد بسته‌ها تغییرات تاخیر به صورت نمودار استخراج گردید، با توجه به شکل‌های (۶) تا (۹) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد بسته‌ها تاخیر در شبکه همچنان ثابت است.

باتوجه به شکل‌های (۶) تا (۹) و همچنین جدول ۳ ملاحظه می‌شود که تاخیر داده‌ها در شبکه TSN نسبت به تاخیر ایجاد شده در گذرگاه ۱۵۵۳ کمتر است. در عمل همیشه با افزایش حجم داده‌ها انتظار داریم که تاخیر آنها بیشتر شود ولی در اینجا ملاحظه می‌شود که با توجه به اینکه بیشترین طول بسته داده به TSN Talker 4 اختصاص یافته، ولی در عمل تاخیر کمتری نسبت به بقیه دارد، در سیستم بالاترین اولویت به آن اختصاص داده شد و سیستم حساسیت خود را نسبت به آن افزایش داده و در واقع با کمترین تاخیر نسبت به بقیه، داده آن را به مقصد می‌رساند.

در سناریوی دوم، حجم داده‌ها را مطابق جدول ۲ ثابت نگه داشته و تاثیر افزایش نرخ ارسال، بروی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. چیدمان‌ها نیز مطابق شکل (۱۱) است.

جدول ۳- مقایسه تاخیرها در گذرگاه ۱۵۵۳ و شبکه TSN

System	Packet Size/byte	Max Latency In Bus 1553 (us)	Max Latency In TSN Simulation (us)
Talker1	100	814	643
Talker2	150	1214	532
Talker3	200	1614	456
Talker4	300	2414	335
TG	1500	12014	542

#### - تفسیر نتایج بدست آمده

با توجه به شکل (۱۰)، با افزایش نرخ ارسال داده‌ها همچنان سیستم نسبت به حفظ تاخیرها همراهی خوبی را نشان می‌دهد و این فقط به خاطر پیاده‌سازی دقیق استانداردهای اولویت بندی داده‌ها است. نکته قابل توجه در شکل (۱۰) این است که ملاحظه می‌شود شبکه تا نرخ ارسال  $10^{-4}$  (محور افقی شکل ۱۰ نرخ ارسال را بر اساس زمان نشان می‌دهد مثلاً هر یک دهم ثانیه تکرار ارسال یا هر یک صدم ثانیه و یا ..... ) پاسخ خوبی نسبت به تمامی ترافیک‌ها از جمله BE داشته ولی از این نقطه به بعد همچنان تاخیر صف‌های ترافیک TT را تضمین نموده و فقط در این نقطه

## مراجع

- [1] A.A. Tawfik, A.D. Elbayoumy, M. Hussein, and A. H. Elghandour. "A New Security Mechanism for MIL-STD-1553 Using Authenticated Encryption Algorithms." In *2024 6th International Conference on Computing and Informatics (ICCI)*, 115–19. New Cairo - Cairo, Egypt, 2024.
- [2] J. Banks. "Towards a Common and Repeatable Standard in MIL-STD-1553 Cyber Attack Detection." PhD diss., Queen's University, 2023.
- [3] H. Sağırkaya, and E. Güran Schmidt. "An Approach for Defining Faults in MIL-STD-1553 Bus in an Avionics Architecture." In *2023 IEEE/AIAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1–5. IEEE, 2023.
- [4] E. Lee. *MIL-STD-1553 Tutorial*. Technical Report 3.41. CONDOR Engineering, June 2000.
- [5] L. Zhao, F. He, E. Li, and J. Lu. "Comparison of Time-Sensitive Networking (TSN) and TTEthernet." In *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings*, vol. 2018-Septe, 2018.
- [6] C.M. Fuchs. "The Evolution of Avionics Networks From ARINC 429 to AFDX." *Innovative Internet Technologies and Mobile Communications (IITM), and Aerospace Networks (AN)* 65 (2012).
- [7] F. He, L. Zhao, and E. Li. "Impact Analysis of Flow Shaping in Ethernet-AVB/TSN and AFDX from Network Calculus and Simulation Perspective." *Sensors (Switzerland)* 17, no. 5 (2017).
- [8] E. Mohammadpour, E. Stai, M. Mohiuddin, and J.Y. Le Boudec. "Latency and Backlog Bounds in Time-Sensitive Networking with Credit-Based Shapers and Asynchronous Traffic Shaping." In *Proceedings of the 2018 International Workshop on Network Calculus and Applications, NetCal2018 - Co-located with the 30th International Teletraffic Congress, ITC 2018 and 1st International Conference in Networking Science and Practice*, 1–6. 2018.
- [9] L. Zhao, P. Pop, Z. Zheng, H. Daigmorte, and M. Boyer. "Latency Analysis of Multiple Classes of AVB Traffic in TSN with Standard Credit Behavior Using Network Calculus." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68, no. 10 (2021): 10291–302.
- [10] L. Martenvormfelde, A. Neumann, L. Wisniewski, and J. Jasperneite. "A Simulation Model for Integrating 5G into Time-Sensitive Networking as a Transparent Bridge." In *IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, vol. 2020-Septe, 1103–6. 2020.
- [11] B. Fang, Q. Li, Z. Gong, and H. Xiong. "Simulative Assessments of Credit-Based Shaping and Asynchronous Traffic Shaping in Time-Sensitive Networking." In *2020 12th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*, 111–18. 2020.
- [12] S.S. Craciunas, and R.S. Oliver. "An Overview of Scheduling Mechanisms for Time-Sensitive Networks." In *Proceedings of the Real-Time Summer School (L'École d'Été Temps Réel)*, 1–7. 2017.
- [13] S. Szancer, P. Meyer, and F. Korf. "Migration from SERCOS III to TSN - Simulation-Based Comparison of TDMA and CBS Transportation." In *2018 International Conference Proceedings*, vol. 56, 52–40. 2018.
- [14] Y. Li, J. Jiang, C. Lee, and S.H. Hong. "Practical Implementation of an OPC UA TSN Communication Architecture for a Manufacturing System." *IEEE Access* 8 (2020): 200100–11.
- [15] "Simulation - CoRE Group." Accessed February 3, 2022. <https://core-researchgroup.de/projects/simulation.html>.
- [16] P. Varis, and T. Leyrer. "Time-Sensitive Networking for Industrial Automation." Texas Instruments, Texas, SPRY316, January 2018.