

«بسم الله الرحمن الرحيم»



دانشکده مهندسی کامپیوتر

## بررسی پروتکل (TSN (Time Sensitive Network)



مدارهای واسط – پاییز 1403

استاد: دکتر فصحتی

گردآورنده: عاطفه قندهاری

## فهرست

4 .....	مقدمه .....
4 .....	چرایی توسعه .....
4 .....	کاربردها .....
5 .....	استاندارد و فرمتهای IEE.802.1 .....
6 .....	IEEE 802.1Qbv – زمانبندی ترافیک حساس به زمان .....
6 .....	IEEE 802.1Qcc – هماهنگسازی دقیق زمان و کنترل شبکه .....
6 .....	IEEE 802.1Qci – کنترل و مدیریت کلاس‌های ترافیکی .....
6 .....	IEEE 802.1CB – افزونگی و تحمل خطا در شبکه .....
6 .....	لایه فیزیکی پروتکل TSN و ساختار اتصالات آن .....
6 .....	سیگنالینگ در لایه فیزیکی .....
7 .....	مدار سیگنالینگ تفاضلی .....
8 .....	نوع ارتباط در پروتکل .....
8 .....	نوع انکودینگ در TSN .....
8 .....	نحوه تولید سیگنال .....
9 .....	روش انتقال: همزمان یا ناهمزمان؟ .....
10 .....	قابلیت اتصال چندین دستگاه سخت‌افزاری .....
11 .....	مدیریت برخورد و کنترل ازدحام (Congestion Control) .....
13 .....	آدرس‌دهی و مسیریابی .....
13 .....	نحوه آدرس‌دهی .....
14 .....	نحوه مسیریابی .....
14 .....	مدیریت جریان داده (Control Flow) .....
15 .....	نحوه پیاده‌سازی مدیریت جریان داده .....
17 .....	تشخیص خطا در پروتکل TSN در لایه‌های مختلف .....
17 .....	تشخیص خطا در لایه فیزیکی (Physical Layer) .....
18 .....	تشخیص خطا در لایه پیوند داده (Data Link Layer) .....
19 .....	تشخیص خطا در لایه شبکه (Network Layer) .....
19 .....	تشخیص خطا در لایه انتقال (Transport Layer) .....

19.....	تشخیص خطأ در لایه کاربرد (Application Layer)
<b>20 .....</b>	<b> تصحیح خطأ در TSN</b>
20.....	تصحیح خطأ در لایه فیزیکی (Physical Layer)
21.....	تصحیح خطأ در لایه پیوند داده (Data Link Layer)
21.....	تصحیح خطأ در لایه شبکه (Network Layer)
22.....	تصحیح خطأ در لایه انتقال (Transport Layer)
<b>22 .....</b>	<b> انواع پیام‌ها در TSN و فرمت آن‌ها</b>
23.....	فرمت پیام‌های مختلف در TSN
<b>25 .....</b>	<b> منابع</b>

## مقدمه

پروتکل Time-Sensitive Networking (TSN) مجموعه‌ای از استانداردهای توسعه‌یافته توسط گروه IEEE 802.1 است که با هدف ارائه‌ی شبکه‌های اترنت قابل پیش‌بینی و زمان‌بندی شده برای کاربردهای صنعتی و حساس به زمان توسعه داده شده است.

TSN امکان انتقال داده‌های حساس به زمان و با اولویت بالا در کنار ترافیک عادی شبکه فراهم می‌کند، در حالی که اترنت استاندارد قادر به ارائه‌ی تضمین‌های دقیق زمانی برای انتقال داده‌ها نیست.

فراهم کردن ارتباطات قطعی Deterministic Communication (Deterministic Communication)، TSN ارتباطات قطعی را تضمین می‌کند، یعنی بسته‌های داده دقیقاً در زمان مورد انتظار به مقصد می‌رسند. در شبکه‌های سنتی، بسته‌های داده ممکن است با تأخیر تصادفی مواجه شوند، اما TSN به صورت زمان‌بندی شده و اولویت‌بندی شده داده‌ها را ارسال می‌کند. این قابلیت برای سیستم‌هایی که نیاز به کنترل دقیق و بلادرنگ دارند، مانند دستگاه‌های پزشکی، خودروهای خودران، و ماشین‌های CNC بسیار حیاتی است.

## چرایی توسعه

پیش از توسعه TSN، شبکه‌های صنعتی و حیاتی از شبکه‌های اختصاصی مانند CAN، EtherCAT، PROFINET و (Real-Time Systems) ارائه‌ی سنتی هم به دلیل تأخیر نامشخص و عدم تضمین در کیفیت سرویس (QoS) برای سیستم‌های بلادرنگ مناسب نبود.

## کاربردها

TSN در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد، از جمله:

### اتوماسیون صنعتی

- ایجاد شبکه‌های کنترل صنعتی با تأخیر کم
- جایگزینی باس‌های صنعتی سنتی با اترنت زمان‌بندی شده
- امکان ارتباط بلادرنگ میان PLC‌ها، سنسورها، و محرک‌ها

### خودروهای خودران و سیستم‌های ADAS

- برقراری ارتباط دقیق و قابل پیش‌بینی بین سنسورها، دوربین‌ها، و کنترلرها
- کاهش تأخیر در انتقال داده‌های حیاتی در سیستم‌های ترمز خودکار، پایش جاده، و فرمان‌پذیری

### شبکه‌های مخابراتی (Beyond 5G و 5G)

- ایجاد ارتباطات با تأخیر کم برای G5 Core Network در
- پشتیبانی از Cloud RAN و Edge Computing

### سیستم‌های هوافضا و نظامی

- کاهش تأخیر در ارتباطات داخلی تجهیزات نظامی و هوایپیماها

▪ افزایش قابلیت اطمینان در شبکه‌های تاکتیکی بلادرنگ

▪ سیستم‌های پخش صوت و تصویر(AVB/TSN)

▪ همگام‌سازی دقیق و کاهش تأخیر در استودیوهای ضبط و کنفرانس‌های آنلاین

## استاندارد و فرمتهای IEE.802.1

TSN مجموعه‌ای از ویژگی‌هایی را توصیف می‌کند که به استاندارد اترنت اضافه شده‌اند. ویژگی‌ها در تعدادی از برنامه‌های افزودنی استاندارد IEEE 802.1 تعریف و منتشر شده‌اند که به موضوعاتی مانند زمان‌بندی، همگام‌سازی، ارسال، صف‌بندی، افزونگی یکپارچه و رزرو جریان می‌پردازند. این ویژگی‌های منفرد، عملکرد و کیفیت خدمات (QoS) اترنت را گسترش می‌دهند تا انتقال پیام تضمین شده از طریق شبکه‌های سوئیچ شده را امکان‌پذیر کند و استحکام، قابلیت اطمینان و قطعیت ذاتی مورد نیاز برای یک فناوری ارتباطی صنعتی را فراهم کند.

IEEE 802.1 STANDARDS	FEATURES
802.1AS	Time Synchronization
802.1Qbv	Scheduled Traffic
802.1CB	Seamless Redundancy, Stream Identification
802.1Qcc	SRP Enhancements
802.1Qbu	Frame Preemption
802.1Qci	Filtering and Policing
802.1Qca	Path Control and Reservation
802.1Qch	Cyclic Queuing and Forwarding
802.1Qcr	Asynchronous Traffic Shaping
802.1Qcp	YANG Model for Bridging
802.1Qcw	YANG Model for Qbv, Qbu, Qci
802.1CBcv	YANG model for CB

## IEEE 802.1Qbv – زمان‌بندی ترافیک حساس به زمان

این استاندارد مکانیزم (Time-Aware Shaper (TAS)) را تعریف می‌کند که امکان زمان‌بندی و اولویت‌بندی بسته‌های داده بلادرنگ را فراهم می‌کند.

اولویت‌دهی به داده‌های حساس به تأخیر (مانند فرمان‌های کنترلی ربات‌ها یا سیستم‌های اتوماسیون) ایجاد شفافیت در عبور بسته‌های زمانی خاص، بدون تداخل سایر داده‌ها. بهبود کیفیت ارتباطات صنعتی از طریق زمان‌بندی دقیق ارسال داده‌ها.

## IEEE 802.1Qcc – هماهنگ‌سازی دقیق زمان و کنترل شبکه

این استاندارد مکانیزم‌هایی برای هماهنگ‌سازی زمانی (Synchronization) و مدیریت دقیق منابع شبکه ارائه می‌دهد. تمامی دستگاه‌های متصل به شبکه، هماهنگ عمل می‌کنند. کنترل هماهنگ ربات‌ها و ماشین‌های صنعتی بدون اختلاف زمانی. افزایش دقت و کیفیت تبادل داده در سیستم‌های پیچیده.

## IEEE 802.1Qci – کنترل و مدیریت کلاس‌های ترافیکی

مکانیزم‌هایی برای اولویت‌بندی انواع مختلف داده‌ها بر اساس حساسیت بلادرنگ آن‌ها ارائه می‌دهد. داده‌های حیاتی (مانند داده‌های کنترلی) در اولویت ارسال قرار می‌گیرند. جلوگیری از ازدحام شبکه با تفکیک کلاس‌های ترافیکی و تخصیص منابع مناسب به هر کلاس.

## IEEE 802.1CB – افزونگی و تحمل خطأ در شبکه

افزایش قابلیت اطمینان و تحمل پذیری خطأ شبکه (Fault-Tolerant Communication). استفاده از مسیرهای افزونه (Redundant Paths) برای جلوگیری از قطعی ارتباط در صورت بروز مشکل. افزایش پایداری شبکه در محیط‌های صنعتی حساس.

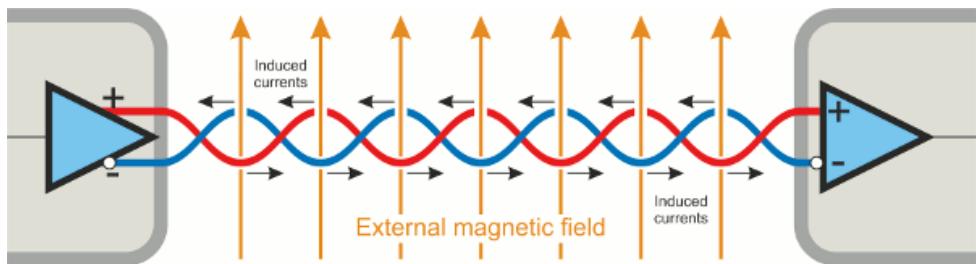
## لایه فیزیکی پروتکل TSN و ساختار اتصالات آن

پروتکل TSN در لایه فیزیکی از استاندارد اترنت (IEEE 802.3) پیروی می‌کند. این پروتکل از انواع اترنت گیگابیتی، 10 گیگابیتی، و حتی 100 گیگابیتی برای انتقال داده‌ها استفاده می‌کند و قابلیت اجرا روی فیبر نوری، کابل‌های مسی، و شبکه‌های بی‌سیم را دارد.

### سیگنالینگ در لایه فیزیکی

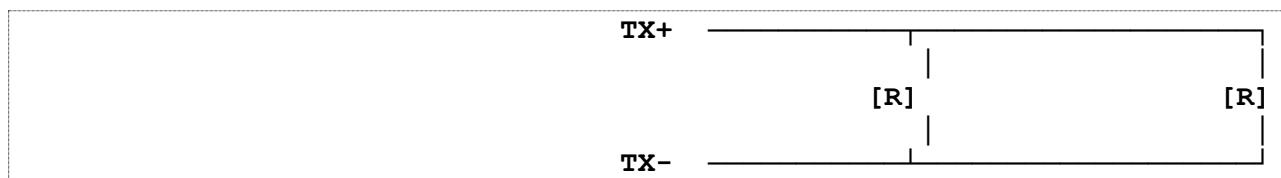
- اترنت مدرن از سیگنالینگ تفاضلی (Differential Signaling) استفاده می‌کند. سیگنالینگ تفاضلی مزایای زیر را فراهم می‌کند:
- \* کاهش نویز الکترومغناطیسی (EMI)
  - \* افزایش یکپارچگی سیگنال (Signal Integrity)
  - \* افزایش مقاومت در برابر تداخلات خارجی

در اترنت گیگابیتی (1000BASE-T) و استانداردهای بالاتر، داده‌ها روی ۴ زوج سیم تفاضلی (Twisted Pair Differential) منتقل می‌شوند.



### مدار سیگنالینگ تفاضلی

مدار پایه‌ی فرستنده و گیرنده سیگنال تفاضلی در TSN مشابه اترنت گیگابیتی است. شکل زیر یک نمونه مدار تفاضلی برای ارسال داده در اترنت را نشان می‌دهد:



$TX+$  و  $TX-$  : خروجی‌های تفاضلی فرستنده  
 $R$  : مقاومت‌های تطبیق امپدانس ( $\Omega$  ۱۰۰) برای کاهش بازتاب سیگنال

در سمت گیرنده، یک دیفرانسیل آمپلی‌فایر (Differential Amplifier) مانند LMH7322 برای بازسازی سیگنال استفاده می‌شود.

### اتصالات ضروری

$RJ-45$  یا M12 : برای ارتباط در اترنت مسی  
فیبر نوری (ST, SC, LC) : برای ارتباطات با تأخیر کم  
کابل‌های زوج به هم تابیده (Cat7, Cat6, Cat5e) : برای کاهش نویز

### اتصالات اختیاری

Power over Ethernet (PoE) : برای تأمین برق تجهیزات از طریق کابل شبکه  
اتصال سینک PTP (Precision Time Protocol) : برای همگام‌سازی دقیق زمان  
پورت‌های اضافی برای Redundancy (Redundant Networks) : در سیستم‌های صنعتی با نیاز به افزونگی

## نوع ارتباط در پروتکل

### سریال یا موازی؟

پروتکل TSN بر پایه اترنت استاندارد (IEEE 802.3) است، بنابراین ارتباط آن سریال است، نه موازی.

### چرا سریال؟

- \* استفاده از کابل‌های زوج به هم تاییده (Twisted Pair)
- \* کاهش تعداد خطوط انتقال و کاهش هزینه
- \* قابلیت پشتیبانی از سرعت‌های بالا (گیگابیتی و فراتر از آن)

در اترنت گیگابیتی (10GBASE-T) و اترنت 10 گیگابیتی (10GBASE-T) داده‌ها روی ۴ جفت سیم به صورت تفاضلی و سریال منتقل می‌شوند.

## نوع انکودینگ در TSN

انکودینگ در TSN وابسته به نوع اترنتی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- Manchester Encoding → 10BASE-T
- 100BASE-TX → 4B/5B + MLT-3
- 1000BASE-T → PAM-5 (Pulse Amplitude Modulation with 5 levels)
- 10GBASE-T → PAM-16

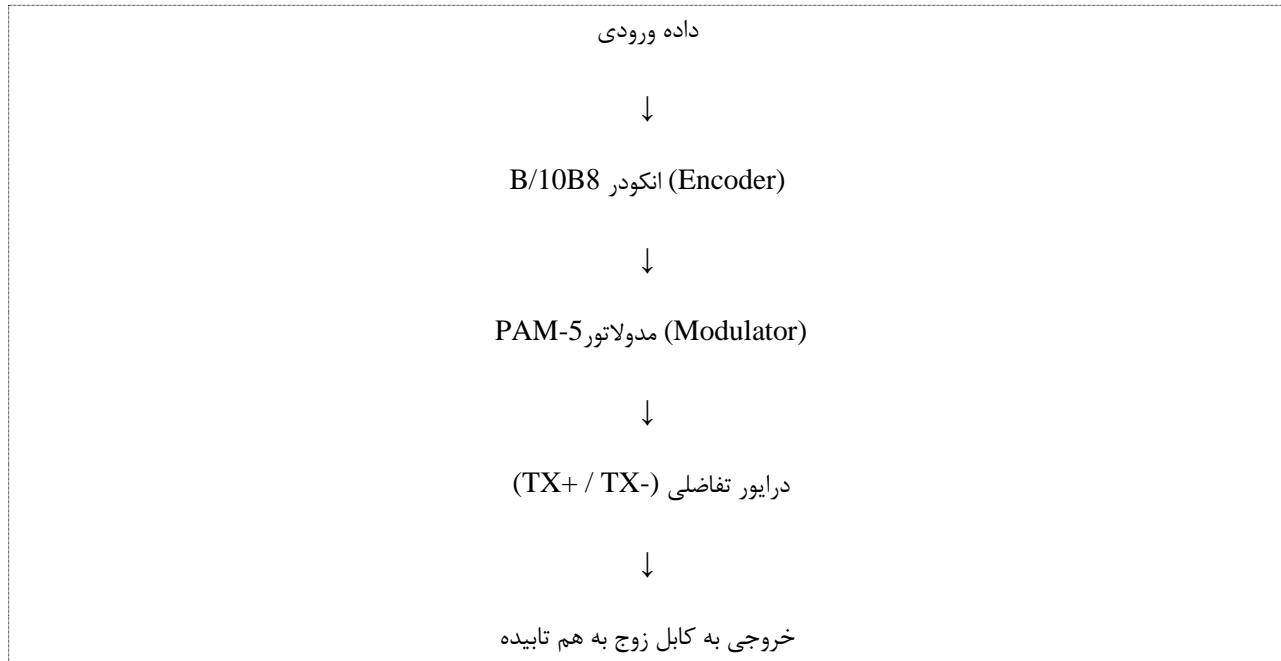
در اترنت گیگابیتی (TSN 1000BASE-T)، از مدولاسیون دامنه پالس ۵ سطحی (PAM-5) استفاده می‌شود که در هر لحظه ۲ بیت را روی هر جفت سیم انتقال می‌دهد.

## نحوه تولید سیگنال

مدار کلی تولید سیگنال در یک فرستنده اترنت گیگابیتی (1000BASE-T) شامل مراحل زیر است:

- \* پردازش داده‌ها در MAC Layer
- \* انکودینگ داده‌ها (PAM-5 در گیگابیتی)
- \* مدولاسیون و ارسال از طریق خط انتقال تفاضلی

مدار ساده تولید سیگنال تفاضلی (TX Circuit) :



## روش انتقال: همزمان یا ناهمزمان؟

پروتکل TSN دارای یک روش انتقال ترکیبی است:

در لایه فیزیکی، انتقال به صورت ناهمزمان (Asynchronous) انجام می‌شود زیرا اترنت از کلک داخلی و تکنیک‌های همگام‌سازی ساعتی (Clock Recovery) استفاده می‌کند.

در سطح شبکه و TSN، انتقال همزمان (Synchronous) است چون از IEEE 802.1AS (Timing and Synchronization) همگام‌سازی دقیق استفاده می‌شود.

## قابلیت اتصال چندین دستگاه سخت‌افزاری

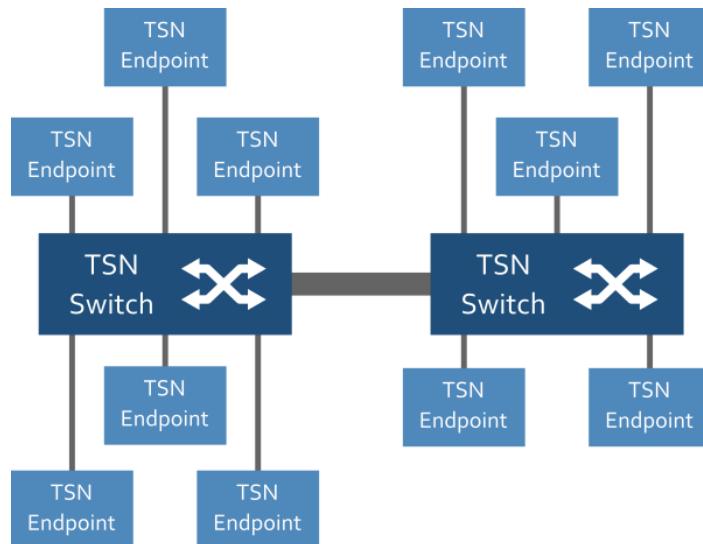
TSN را می‌توان برای اتصال چندین دستگاه سخت‌افزاری استفاده کرد.

### افزایش قابلیت همکاری (Enhanced Interoperability)

یکی از مشکلات شبکه‌های صنعتی سنتی این بود که هر سازنده تجهیزات، پروتکل مخصوص به خود را داشت و این موضوع باعث می‌شد که دستگاه‌های مختلف با یکدیگر ناسازگار باشند.

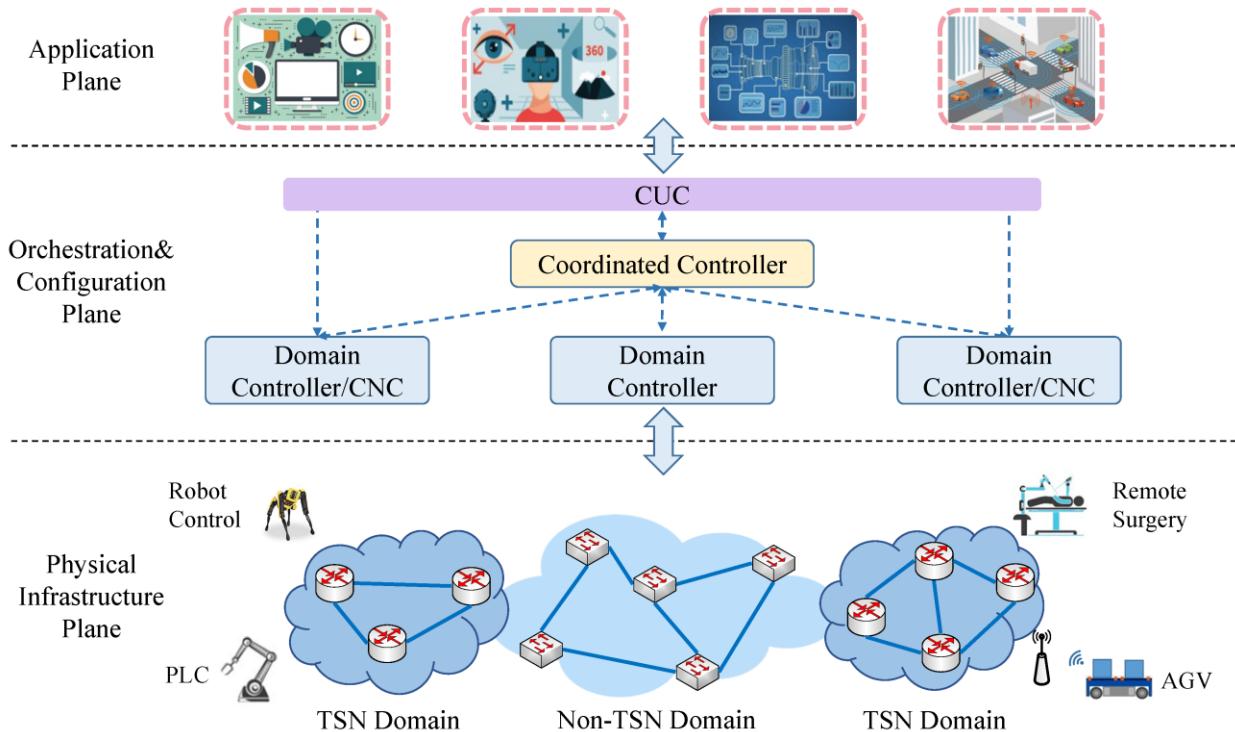
TSN امکان ارتباط بین سیستم‌های مختلف را فراهم می‌کند، بنابراین دستگاه‌های تولید شده توسط شرکت‌های مختلف می‌توانند در یک شبکه واحد کار کنند.

این ویژگی به نوآوری در صنعت کمک می‌کند و باعث می‌شود که شرکت‌ها بدون نگرانی از ناسازگاری، تجهیزات خود را ارتقا دهند.



پروتکل TSN همانند اترنت استاندارد، از تopoلوجی‌های متنوع برای اتصال چندین مژول سخت‌افزاری پشتیبانی می‌کند:

- ستاره‌ای (Star Topology) : با استفاده از یک سوئیچ TSN که همه دستگاه‌ها را متصل می‌کند.
- حلقه‌ای (Ring Topology) : برای افزونگی (Redundancy) و بهبود پایداری شبکه.
- درختی (Tree Topology) : برای ارتباطات سلسله‌مراتبی بین چندین دستگاه.
- مش (Mesh Topology) : در سیستم‌های توزیع شده با ارتباط مستقیم بین دستگاه‌ها.



تجهیزات مورد نیاز:

1. سوئیچ‌های TSN که قابلیت زمان‌بندی و اولویت‌بندی بسته‌ها را دارند.
2. کارت‌های شبکه (NIC) سازگار با TSN در دستگاه‌های متصل.
3. پروتکل IEEE 802.1AS برای همگام‌سازی زمانی بین دستگاه‌ها.

## مدیریت برخورد و کنترل ازدحام (Congestion Control)

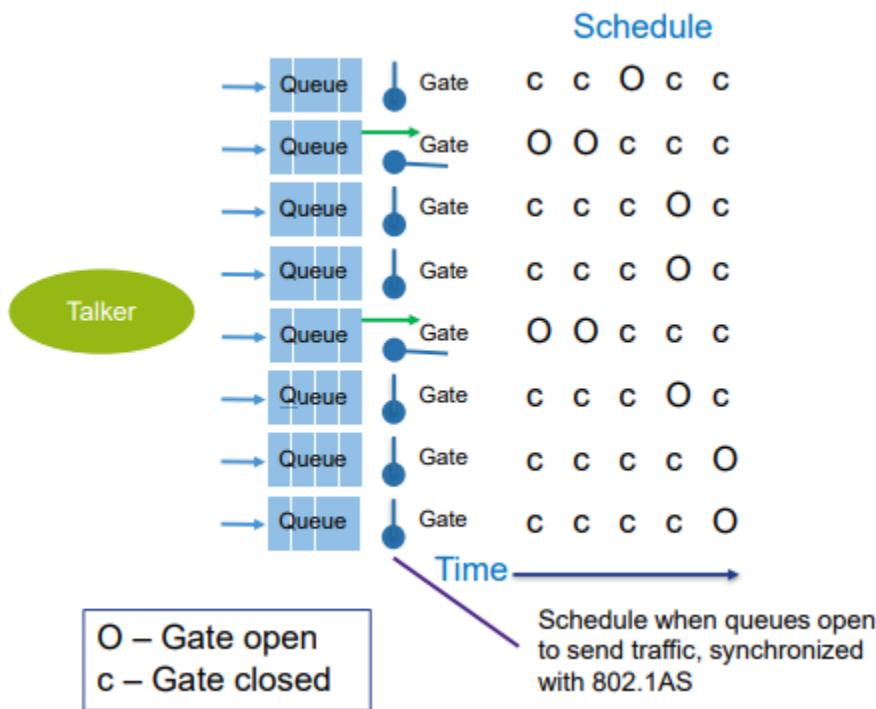
TSN برخلاف اترنت سنتی، مکانیسم‌های خاصی برای مدیریت ازدحام و جلوگیری از برخورد بسته‌ها دارد:

### (الف) جلوگیری از برخورد (Collision Avoidance)

TSN از سوئیچینگ استفاده می‌کند، نه هاب، بنابراین برخورد بسته‌ها رخ نمی‌دهد. هر پورت در سوئیچ TSN یک صفحه خاص برای ارسال داده‌های حساس به زمان دارد.

ویژگی‌های کلیدی TSN که زمان تحویل پیام را تضمین می‌کند، همگام سازی زمان و زمان بندی ترافیک است. آنها به ترتیب توسط استانداردهای AS802.1 و Qbv802.1 خطا می‌شوند. همه دستگاه‌های شرکت‌کننده در شبکه TSN با یک زمان جهانی هماهنگ شده‌اند و از یک برنامه زمان‌بندی شبکه آگاه هستند که تعیین می‌کند پیام‌های اولویت‌بندی شده چه زمانی از هر سوئیچ ارسال می‌شوند.

TSN از صفحه‌ای متعدد در هر پورت در خروجی سوئیچ استفاده می‌کند، جایی که پیام‌ها تا باز شدن یک دروازه (در یک شکاف زمانی مشخص شده توسط برنامه) برای انتشار پیام‌های صفت برای انتقال نگه داشته می‌شوند. انتشار زمان‌بندی شده پیام‌ها تضمین می‌کند که تأخیرها در شبکه می‌توانند به طور قطعی پیش‌بینی و مدیریت شوند. این امکان همگرایی ترافیک بحرانی و ترافیک غیر بحرانی را در یک شبکه فراهم می‌کند.



### ب) کنترل ازدحام (Congestion Control)

#### Time-Aware Shaper (TAS) - IEEE 802.1Qbv .1

زمان‌بندی دقیق ارسال بسته‌ها، تضمین می‌کند که بسته‌های با اولویت بالا بدون تأخیر ارسال شوند.

#### Frame Preemption - IEEE 802.1Qbu .2

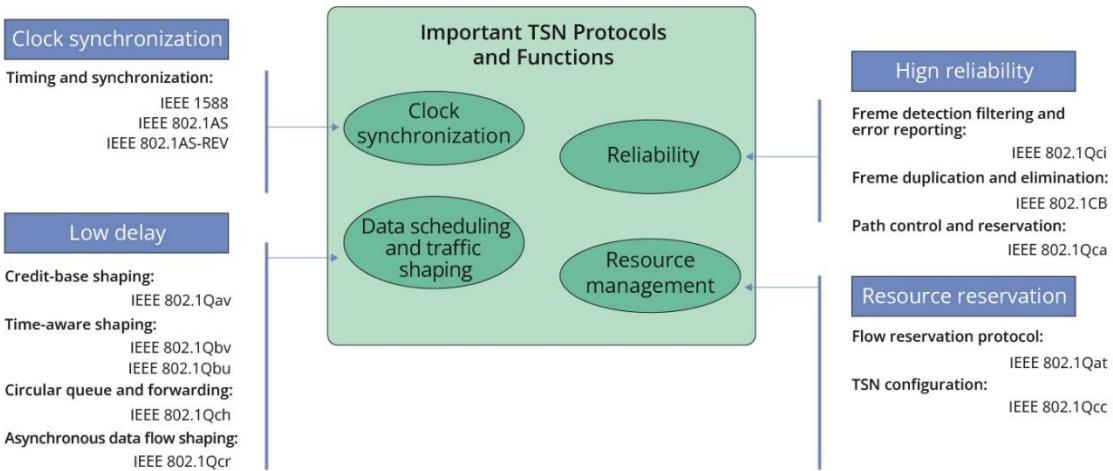
بسته‌های بلاذرنگ می‌توانند بسته‌های کم‌اهمیت‌تر را قطع کرده و سریع‌تر ارسال شوند.

#### Stream Reservation Protocol (SRP) - IEEE 802.1Qat .3

پهنه‌ای باند از پیش رزرو می‌شود تا ترافیک بلاذرنگ دچار تأخیر نشود.

#### Credit-Based Shaper (CBS) - IEEE 802.1Qav .4

کنترل جریان داده با تخصیص اعتبار برای جلوگیری از اشباع شدن لینک‌ها.



## آدرس دهی و مسیریابی

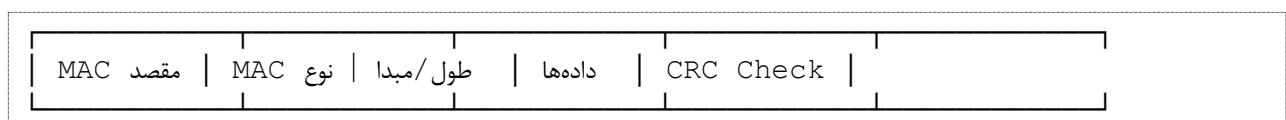
پروتکل TSN (Time-Sensitive Networking) بر پایه اترنت استاندارد (IEEE 802.3) و لایه دوم (Data Link Layer) مدل OSI کار می‌کند. بنابراین، آدرس دهی و مسیریابی در TSN مشابه اترنت سنتی است و بر اساس آدرس‌های MAC و سوئیچینگ لایه ۲ انجام می‌شود.

TSN از آدرس‌های MAC برای مسیریابی فریم‌های داده استفاده می‌کند. سوئیچ‌های TSN جداول مسیریابی داخلی دارند و تصمیم می‌گیرند که هر بسته به کدام پورت ارسال شود.

### نحوه آدرس دهی

TSN از آدرس‌های MAC (48‌بیتی) برای شناسایی دستگاه‌ها استفاده می‌کند. هر دستگاه در شبکه TSN دارای یک آدرس MAC یکتا است. فریم‌های TSN شامل آدرس MAC مبدأ و مقصد هستند.

ساختار فریم اترنت در TSN :



.2 : مشخص می‌کند که بسته باید به کدام دستگاه ارسال شود. (Destination MAC Address) MAC .2

.3 : آدرس فرستنده را نشان می‌دهد. (Source MAC Address) MAC .3

4. نوع/طول (EtherType/Length) : نوع پروتکل لایه بالاتر را مشخص می‌کند.

5. داده‌ها (Payload) : شامل اطلاعات اصلی بسته است.

6. CRC (Cyclic Redundancy Check) : برای بررسی صحت داده‌ها استفاده می‌شود.

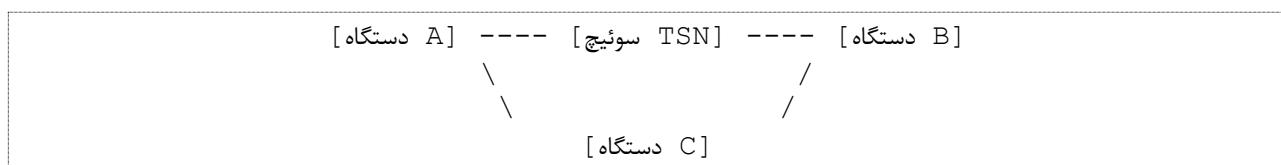
## نحوه مسیریابی

مسیریابی در TSN از طریق سوئیچ‌های TSN انجام می‌شود. این سوئیچ‌ها مسیرهای بسته‌ها را بر اساس جدول آدرس‌دهی MAC تعیین می‌کنند.

سوئیچ‌ها کمک می‌کنند تا مسیرهای مخصوص داده‌های حساس به زمان را رزرو کنند.

TSN تضمین می‌کند که بسته‌ها در زمان‌های دقیقی ارسال شوند.

مثال مسیریابی در TSN با سوئیچ‌ها:



اگر دستگاه A بخواهد به دستگاه B بسته ارسال کند:

1. بسته شامل آدرس MAC مقصد (B) است.

2. سوئیچ TSN، جدول MAC خود را بررسی می‌کند.

3. بسته را فقط به پورت مربوط به B ارسال می‌کند (نه به C).

اگر دستگاه A بخواهد یک پیام چندپخشی (Multicast) ارسال کند:

1. بسته دارای آدرس چندپخشی (مثلاً E:xx:xx:xx:01:00:5) خواهد بود.

2. سوئیچ بسته را به تمام دستگاه‌های مرتبط ارسال می‌کند.

## مدیریت جریان داده (Control Flow)

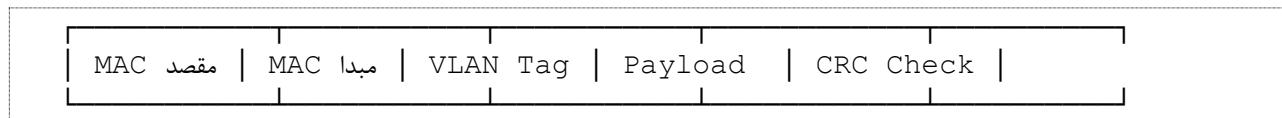
مدیریت جریان داده (Control Flow) مکانیزمی است که از ازدحام و از دست رفتن بسته‌ها در شبکه جلوگیری می‌کند. در TSN، این کار با استفاده از استانداردهای IEEE 802.1Q انجام می‌شود که امکان کنترل دقیق پهناهی باند، تأخیر و اولویت‌بندی بسته‌ها را فراهم می‌کنند.

## نحوه پیاده‌سازی مدیریت جریان داده

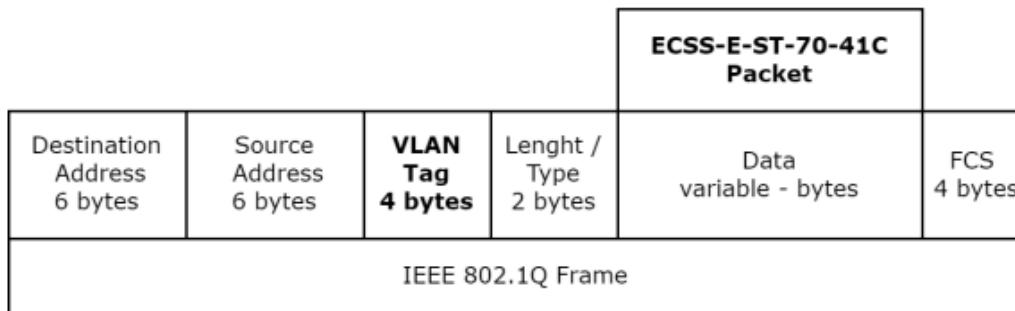
در TSN، مدیریت جریان داده بر اساس صفت‌بندی و کنترل ارسال فریم‌ها انجام می‌شود. این مکانیزم‌ها عبارت‌اند از:

### 1. اولویت‌بندی ترافیک با استاندارد IEEE 802.1Q (Tagged VLAN)

فریم‌های TSN دارای برچسب VLAN (802.1Q) هستند که اولویت انتقال داده‌ها را مشخص می‌کند.  
ساختار فریم اترنت TSN با VLAN Tagging :



تگ VLAN شامل ۳ بیت Priority Code Point (PCP) است که ۸ سطح اولویت را تعریف می‌کند. سوئیچ‌های TSN می‌توانند بسته‌های بلادرنگ را سریع‌تر پردازش کنند و بسته‌های با اولویت کم را به تعویق بیندازند.



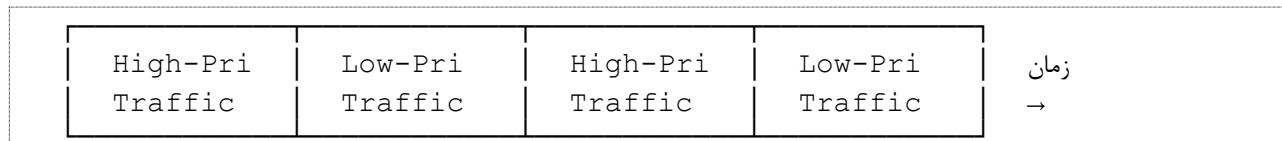
### 2. زمان‌بندی آگاه از زمان (Time-Aware Shaper - IEEE 802.1Qbv)

این مکانیزم، اسلات‌های زمانی (Time Slots) را برای ارسال بسته‌ها تخصیص می‌دهد و باعث می‌شود داده‌های بلادرنگ بدون تداخل ارسال شوند.

نحوه عملکرد:

1. فریم‌های با اولویت بالا (مثلاً کنترل بلادرنگ صنعتی) در اسلات‌های اختصاصی ارسال می‌شوند.
2. فریم‌های با اولویت پایین (مثلاً ترافیک عادی اینترنت) فقط در بازه‌های زمانی مجاز ارسال می‌شوند.

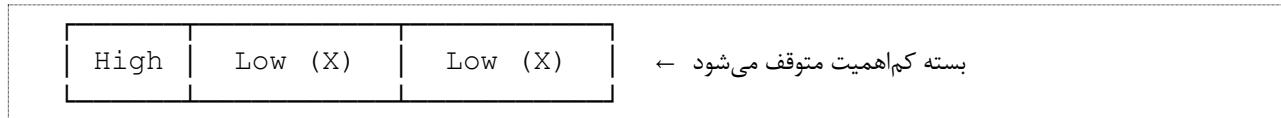
مثال شکل‌گیری اسلات‌های زمانی در یک سوئیچ TSN :



### ۳. پیش‌پردازش فریم‌ها (Frame Preemption - IEEE 802.1Qbu)

اگر یک بسته کم‌اهمیت در حال ارسال باشد، بسته با اولویت بالا می‌تواند ارسال آن را متوقف کرده و خودش زودتر ارسال شود. بعد از ارسال بسته بلادرنگ، بسته قطع شده مجدداً ارسال می‌شود.

شبیه‌سازی عملکرد Frame Preemption در سوئیچ TSN :



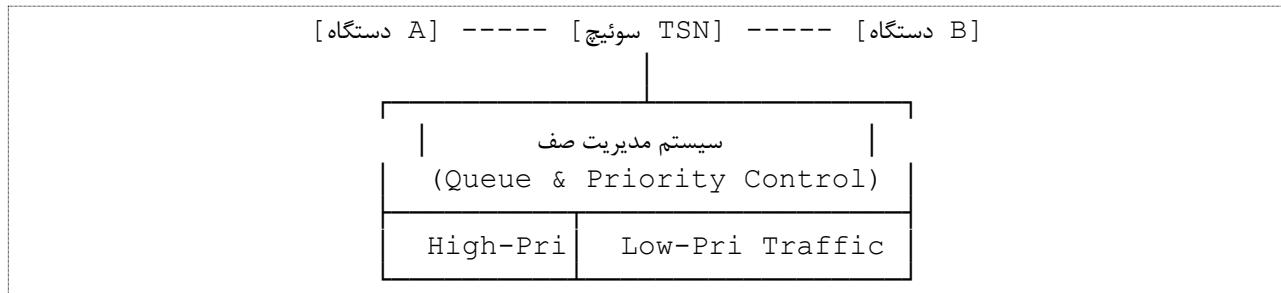
### ۴. کنترل مبتنی بر اعتبار (Credit-Based Shaper - IEEE 802.1Qav)

هر جریان داده در TSN بر اساس اعتبار (Credit) کنترل می‌شود. هنگامی که یک جریان از اعتبار خود استفاده می‌کند، باید مدتی صبر کند تا اعتبار جدید کسب کند. این روش تضمین می‌کند که داده‌های با اولویت پایین از کل پهنه‌ی باند استفاده نکنند.

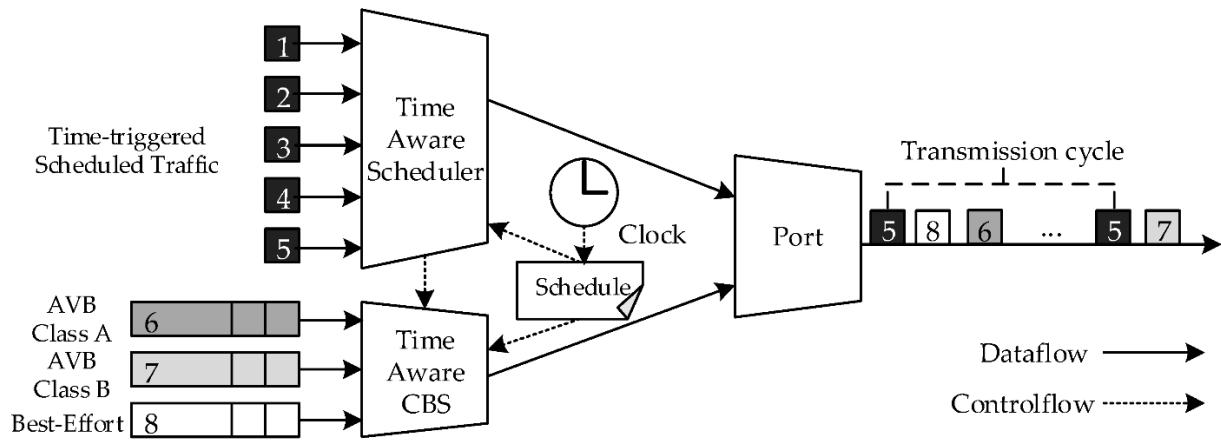
نحوه عملکرد Credit-Based Shaper در یک لینک TSN :



شکل کلی پیاده‌سازی Control Flow در TSN



بسته‌های با اولویت بالا (High-Pri) از مسیر سریع ارسال می‌شوند. بسته‌های با اولویت پایین (Low-Pri) تا زمان تخصیص پهنه‌ی باند در صف می‌مانند.



## تشخیص خطا در پروتکل TSN در لایه‌های مختلف

پروتکل TSN (Time-Sensitive Networking) همانند اترنت استاندارد، مکانیزم‌های مختلفی برای تشخیص خطا در لایه‌های فیزیکی، پیوند داده، و لایه‌های بالاتر دارد. در اینجا نحوه عملکرد هر لایه در تشخیص خطا توضیح داده می‌شود.

### تشخیص خطا در لایه فیزیکی (Physical Layer)

لایه فیزیکی در TSN معمولاً از اترنت گیگابیتی و چند گیگابیتی (10G, 25G, 100G) استفاده می‌کند.

در این لایه، تشخیص خطا با روش‌های زیر انجام می‌شود:

#### 1. کدگذاری خطا - (Error Encoding)

کدهای خطای خطی مثل (64b/66b, 8b/10b) در این روش، هر بیت داده به بیت‌های اضافی (Redundant Bits) تبدیل می‌شود که امکان تشخیص و تصحیح خطا را فراهم می‌کنند.

مثال کدگذاری 8b/10b

: داده اصلی	11011000	(8بیت)
: کد شده	1101100010	(10بیت، شامل بیت‌های تصحیح)

#### 2. تشخیص خطای فیزیکی - (Physical Link Error Detection)

در صورتی که ارتباط بین دو گره از همگام‌سازی خارج شود، گیرنده می‌تواند متوجه خطا شود و ارتباط را مجدداً تنظیم کند.

تشخیص خطای لینک در لایه فیزیکی TSN

[گیرنده] -----X----- [فرستنده]

(سیگنال نویزی → بازنظمی ارتباط)

### ۳. تحلیل سطح ولتاژ و جریان در کابل‌ها

نوسانات ولتاژ یا جریان غیرعادی در کابل می‌تواند نشانه خرابی باشد.  
برخی تجهیزات شبکه خطای CRC لایه فیزیکی را تشخیص داده و هشدار می‌دهند.

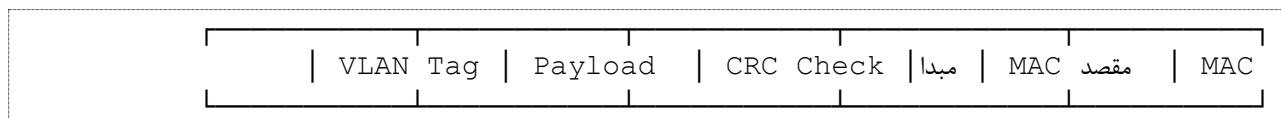
## تشخیص خطای (Data Link Layer) در لایه پیوند داده

در این لایه TSN از مکانیزم‌های مختلف بررسی یکپارچگی داده‌ها و جلوگیری از ارسال داده‌های خراب استفاده می‌کند.

### ۱. بررسی افزونگی چرخه‌ای (Cyclic Redundancy Check - CRC)

در هر فریم TSN یک مقدار CRC اضافه می‌شود که گیرنده از آن برای تشخیص خطاهای انتقال استفاده می‌کند.  
اگر مقدار CRC محاسبه شده در گیرنده با مقدار فرستاده شده مطابقت نداشته باشد، داده‌ها حذف می‌شوند.

ساختار فریم اترنت با CRC در TSN



### ۲. مکانیزم Frame Loss Detection

در TSN، سوئیچ‌ها می‌توانند تشخیص دهند که بسته‌ای در طول مسیر از بین رفته است.  
برای این کار از تایмерهای نظارت بر ترافیک (Traffic Policing Timers) استفاده می‌شود.

### ۳. مکانیزم Frame Replication & Elimination (IEEE 802.1CB)

در برخی موارد، TSN می‌تواند یک فریم را از طریق دو مسیر مختلف ارسال کند و سپس در مقصد آن را تطبیق دهد.  
اگر یکی از بسته‌ها گم شود، گیرنده بسته دیگر را قبول می‌کند.

نحوه عملکرد مکانیزم حذف فریم تکراری (Frame Replication & Elimination)

[گیرنده] → مسیر ۱ → [فرستنده]

↗ مسیر ۲ لا

### ۴. بررسی ترتیب فریم‌ها (Sequence Number Checking)

هر بسته در TSN دارای شماره ترتیبی (Sequence Number) است.  
اگر بسته‌ای گم شود، گیرنده متوجه عدم تطابق شماره‌ها شده و درخواست ارسال مجدد می‌کند.

## تشخیص خطا در لایه شبکه (Network Layer)

TSN یک پروتکل لایه ۲ است و مستقیماً از لایه شبکه استفاده نمی‌کند. اما در صورت استفاده از TSN در شبکه‌های IP، می‌توان از مکانیزم‌های ICMP و OAM برای بررسی خطا استفاده کرد.

۱. **پینگ (ICMP Echo Request/Reply)** برای بررسی قطعی لینک ارسال و دریافت پاسخ پینگ (Ping) می‌تواند مشخص کند که آیا ارتباط بین دو گره برقرار است یا نه.

۲. **بررسی جدول مسیریابی در TSN** در شبکه‌های گستردگی، جدول‌های مسیریابی باید بروزرسانی شوند. اگر مسیری در جدول موجود نباشد، بسته‌ها دور ریخته می‌شوند.

---

## تشخیص خطا در لایه انتقال (Transport Layer)

در صورتی که TSN با پروتکل‌های TCP یا UDP ترکیب شود، می‌توان از مکانیزم‌های زیر استفاده کرد:

۱. **کنترل بازفرست بسته‌ها (Retransmission Control - TCP)** اگر یک بسته TCP گم شود، گیرنده می‌تواند از طریق ACK و تایمراهی بازفرست درخواست ارسال مجدد کند. این قابلیت در TSN کمتر استفاده می‌شود زیرا TSN روی تأخیر کم تمرکز دارد و بازفرست می‌تواند مشکل‌ساز شود.
۲. **بررسی ترتیب بسته‌ها (Out-of-Order Packet Detection)** در TCP، بسته‌ها با شماره‌های ترتیبی ارسال می‌شوند و اگر ترتیب آنها به هم بخورد، گیرنده می‌تواند درخواست تصحیح کند.

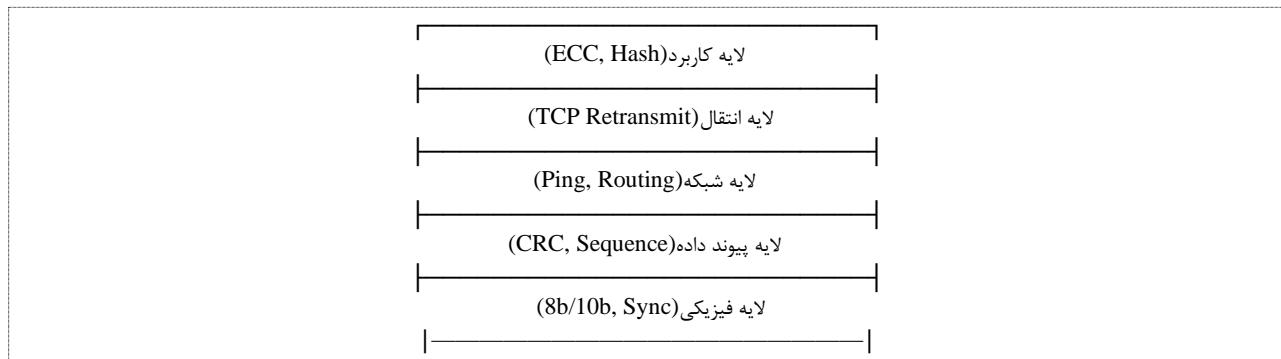
---

## تشخیص خطا در لایه کاربرد (Application Layer)

در این لایه، بسته‌های داده ممکن است دارای امضاهای دیجیتال یا هش امنیتی (Hashing) برای تأیید صحت داده‌ها باشند. برخی برنامه‌های صنعتی از کد تصحیح خطای خودکار بیت‌های خراب شده استفاده می‌کنند.

۱. **تأیید صحت پیام با هش (Message Integrity Hashing - SHA, MD5)** برنامه‌های بلاذرنگ می‌توانند هش پیام‌ها را بررسی کنند تا مشخص شود که آیا داده‌ها سالم هستند یا نه.
۲. **کد تصحیح خطای پیشرفته (Reed-Solomon ECC)** برخی برنامه‌های صنعتی حساس از کدهای تصحیح خطای برای تصحیح بیت‌های معیوب استفاده می‌کنند.

\* شکل کلی از تشخیص خطای لایه‌های مختلف



## تصحیح خطای TSN در

TSN به عنوان یک پروتکل صنعتی حساس به زمان، نه تنها باید خطاهای را تشخیص دهد، بلکه باید بتواند خطاهای را تصحیح کرده و ارتباطات شبکه را بدون تأخیر یا از دست رفتن داده حفظ کند. برای این منظور، TSN چندین مکانیسم تصحیح خطای را در سطوح مختلف پیاده‌سازی کرده است.

### تصحیح خطای در لایه فیزیکی (Physical Layer)

در این لایه، TSN از روش‌های کدینگ خطای (Error Coding) استفاده می‌کند تا خطاهای ناشی از نویز، تداخل و از بین رفتن داده‌ها را اصلاح کند.

#### 1. : (FEC) Forward Error Correction.

این روش به گیرنده اجزه می‌دهد بدون نیاز به درخواست مجدد (Retransmission) برخی از خطاهای داده‌ای را تصحیح کند. در محیط‌های صنعتی که ارسال مجدد ممکن است باعث تأخیر شود، اهمیت بالایی دارد.

#### 2. کدینگ خطای (Reed-Solomon, Hamming, CRC)

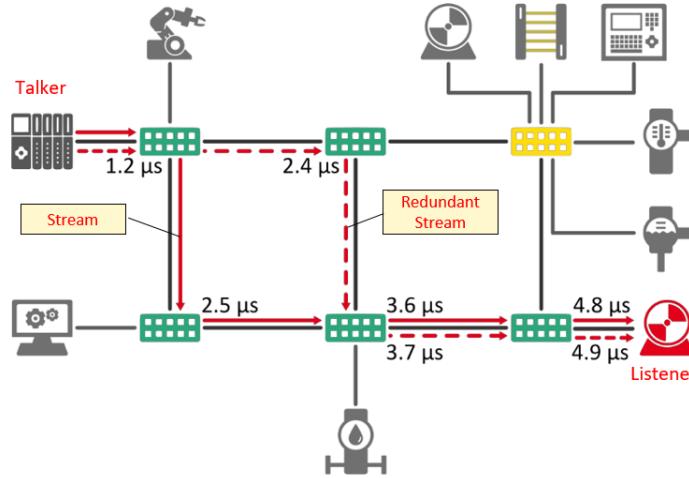
TSN از روش‌های کدینگ مختلفی استفاده می‌کند تا بسته‌های داده‌ای که ممکن است دارای بیت‌های معیوب باشند، اصلاح شوند.

## تصحیح خطای در لایه پیوند داده (Data Link Layer)

در این لایه، TSN از مکانیسم‌های افزونگی و بازیابی برای تصحیح خطاهای بسته‌های از دست رفته یا آسیب‌دیده استفاده می‌کند.

### ۱. IEEE 802.1CB (Frame Replication and Elimination for Reliability - FRER)

این استاندارد TSN یک قابلیت افزونگی (Redundancy) فراهم می‌کند که بسته‌های داده را از مسیرهای مختلف ارسال می‌کند. در صورتی که یکی از مسیرها دچار خطا شود، داده از مسیر دیگر بازیابی می‌شود.



### ۲. مکانیسم "Packet Elimination"

در این روش، بسته‌های تکراری حذف شده و تنها نسخه صحیح داده پردازش می‌شود. این روش باعث کاهش خطاهای ناشی از بسته‌های خراب یا از دست رفته می‌شود.

## تصحیح خطای در لایه شبکه (Network Layer)

### ۱. Time-Aware Scheduling (IEEE 802.1Qbv)

این روش باعث کاهش تصادم داده‌ها شده و احتمال از بین رفتن بسته‌های اطلاعاتی را کاهش می‌دهد.

### ۲. Flow Control و Traffic Shaping

با زمان‌بندی هوشمند ترافیک، ازدحام کاهش یافته و احتمال از دست رفتن بسته‌ها به حداقل می‌رسد.

TSN از Traffic Shaping استفاده می‌کند تا ترافیک را مدیریت کند.

نرخ(rate) ارسال بسته‌های داده تنظیم می‌شود تا ازدحام ایجاد نشود.

این تکنیک تضمین می‌کند که عملکرد شبکه پایدار و قابل پیش‌بینی باشد.

## تصحیح خطای انتقال (Transport Layer)

### : Automatic Repeat reQuest (ARQ) .1

در صورت شناسایی بسته‌های معیوب، سیستم درخواست ارسال مجدد داده را ارسال می‌کند. این روش معمولاً در کاربردهایی که نیاز به تحویل حتمی داده دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### : Hybrid ARQ (HARQ) .2

ترکیب روش ARQ و FEC برای ارسال مجدد داده‌ها بهصورت انتخابی، باعث می‌شود فقط بخش‌های خراب داده مجدد ارسال شوند و تأخیر کاهش یابد.

## انواع پیام‌ها در TSN و فرمت آن‌ها

TSN به عنوان یک استاندارد توسعه‌یافته برای شبکه‌های صنعتی حساس به زمان، انواع مختلفی از پیام‌ها را برای مدیریت، همگام‌سازی، کنترل جریان داده، و انتقال اطلاعات بلاذرنگ فراهم می‌کند.

TSN دارای چندین نوع پیام کلیدی است که هر یک برای کاربردی خاص طراحی شده‌اند:

### 1. پیام‌های داده‌ای (Data Messages)

- شامل بسته‌های اطلاعاتی واقعی برای کنترل صنعتی، اتوماسیون، رباتیک، و پردازش داده‌ها است.
- این پیام‌ها در بازه‌های زمانی دقیق و مشخص ارسال می‌شوند.

### 2. پیام‌های همگام‌سازی زمانی (Synchronization Messages)

- شامل پیام‌های IEEE 802.1AS (Precision Time Protocol - PTP) که برای همگام‌سازی ساعت‌های دستگاه‌ها در سراسر شبکه استفاده می‌شود.

### 3. پیام‌های کنترلی و مدیریتی (Control & Management Messages)

- شامل پیام‌های رزرو منابع (Stream Reservation Protocol - SRP) که ترافیک داده‌های حساس به زمان را در شبکه مدیریت می‌کنند.

### 4. پیام‌های افزونگی و تصحیح خطای افزاونگی (Redundancy & Error Correction Messages)

- شامل پیام‌های IEEE 802.1CB که برای ایجاد افزونگی و ارسال مجدد بسته‌های از دست رفته استفاده می‌شوند.

## فرمت پیام‌های مختلف در TSN

### ۱. فرمت پیام‌های داده‌ای (TSN Data Frame Format)

فرمت این پیام‌ها براساس ساختار استاندارد اترنت (Ethernet Frame) طراحی شده است:

Preamble   Destination MAC   Source MAC   EtherType   VLAN Tag (Optional)	TSN Time-Sensitive Data Payload   Frame Check Sequence (FCS)
---	--

اجزای کلیدی:

- سیگنال شروع فریم اترنت : Preamble
- آدرس‌های مبدأ و مقصد : Destination MAC & Source MAC
- نوع پروتکل (مشخص کننده اینکه این فریم متعلق به TSN است) : EtherType
- در صورت استفاده از VLAN Tag (Optional) : VLAN Tag (Optional)
- اطلاعات واقعی که باید ارسال شوند : TSN Data Payload
- بررسی صحت داده‌ها : FCS

### ۲. فرمت پیام‌های همگام‌سازی (IEEE 802.1AS PTP Sync Message)

این پیام‌ها برای همگام‌سازی ساعت‌های تجهیزات مختلف در شبکه به کار می‌روند.

PTP Header   Sequence ID   Timestamp   Correction   Clock Identity   Precision Time Data
--

اجزای کلیدی:

- هدر پیام پروتکل PTP Header
- شماره پیام برای شناسایی توالی Sequence ID
- زمان ارسال پیام برای هماهنگی دقیق Timestamp
- تصویح انحرافات زمانی Correction

### ۳. فرمت پیام‌های کنترلی و مدیریتی (SRP - Stream Reservation Protocol Message Format)

این پیام‌ها برای مدیریت ترافیک حساس به زمان و رزرو منابع شبکه استفاده می‌شوند.

Stream ID   Talker Advertise   Listener Ready   Bandwidth Allocation   Traffic Class
--

اجزای کلیدی:

- Stream ID : شناسه جریان داده
- Talker Advertise : اعلام دستگاه ارسال کننده درباره شروع انتقال
- Listener Ready : تایید دریافت از طرف دستگاه گیرنده
- Bandwidth Allocation : میزان پهنانی باند تخصیص داده شده
- Traffic Class : نوع کلاس ترافیکی (مثالاً داده های بلادرنگ یا عادی)

#### 4. فرمت پیام های افزوننگی (Redundant Frame Format) IEEE 802.1CB

این پیام ها برای ارسال داده ها از مسیر های مختلف جهت جلوگیری از از بین رفتن بسته ها استفاده می شوند.

Frame Sequence Number	Redundancy Tag	Data
-----------------------	----------------	------

اجزای کلیدی:

- Frame Sequence Number : شماره توالی فریم
- Redundancy Tag : مشخص کننده مسیر های مختلف ارسال
- Data : اطلاعات ارسالی

## منابع

- [1] <https://community.fs.com/encyclopedia/timesensitive-networking-tsn.html>
- [2] <https://tsn-network.com/>
- [3] <https://1.ieee802.org/tsn/>
- [4] <https://cdrv2-public.intel.com/752516/wp-01279-time-sensitive-networking-theory-to-implementation-in-industrial-automation.pdf>
- [5] [https://indico.esa.int/event/445/contributions/8346/attachments/5532/8979/TimeSensitiveNetworks\\_Microlaunchers\\_v2\\_slides.pdf](https://indico.esa.int/event/445/contributions/8346/attachments/5532/8979/TimeSensitiveNetworks_Microlaunchers_v2_slides.pdf)
- [6] <https://arxiv.org/html/2306.03691v4>