



دانشگاه صنعتی شریف  
دانشکده مهندسی کامپیوتر  
ارائه پایانی درس مدارهای واسط

عنوان:

# پروتکل Thunderbolt

نگارش

روژین تقی زادگان

استاد

استاد فصحتی

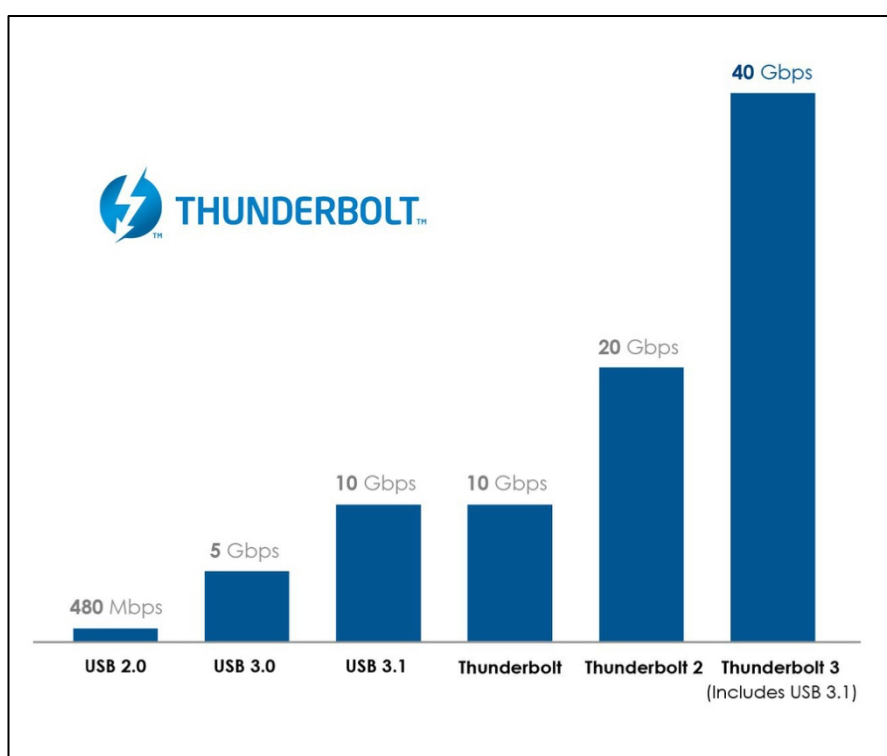
بهمن ۱۴۰۳

3	..... مقدمه
3	۱- کاربرد پروتکل Thunderbolt چیست و چرا نیاز به توسعه این پروتکل بود؟
	۲- اتصالات و مدارات لایه فیزیکی پروتکل Thunderbolt به چه شکل است؟ آیا لایه فیزیکی از سیگنالینگ تفاضلی استفاده می‌کند؟ اتصالات ضروری و اختیاری این پروتکل چیست؟
4	.....
	۳- ارتباط در پروتکل Thunderbolt به صورت سریال است یا موازی؟ نوع انکودینگ این پروتکل چیست؟ روش انتقال آن هم‌زمان است یا ناهم‌زمان؟
5	.....
	۴- آیا پروتکل Thunderbolt را می‌توان جهت چندین دستگاه/ماژول سخت‌افزاری استفاده کرد؟ چالش مدیریت برخورد در این پروتکل چگونه است؟
6	.....
	۵- آدرس‌دهی و مسیریابی در پروتکل Thunderbolt چگونه است؟
8	.....
	۶- قابلیت مدیریت جریان داده در پروتکل Thunderbolt چگونه است؟
8	.....
	۷- نحوه تشخیص خطا در لایه‌های متفاوت پروتکل Thunderbolt چگونه است؟
9	.....
	۸- آیا در پروتکل Thunderbolt رویکردی برای تصحیح خطا هم داریم؟
10	.....
	۹- انواع پیام در پروتکل Thunderbolt به چه صورت هستند؟
10	.....
	منابع
12	.....

پروتکل Thunderbolt یک پروتکل انتقال داده پرسرعت است که توسط شرکت Intel و در همکاری با شرکت Apple توسعه داده شد. Thunderbolt پروتکل‌های مختلف PCIe، DisplayPort و USB را در یک واسطه با هم ترکیب کرده است. این پروتکل همچنین از فناوری شارژ سریع پشتیبانی می‌کند که آن را برای اتصال دستگاه‌های جانبی با کارایی بالا مناسب کرده است.

در نسل‌های مختلف Thunderbolt سعی شده است سرعت و سایر ویژگی‌ها پیشرفت کنند:

Generation	Max Speed	PCIe Version	DisplayPort Version	Connector Type
Thunderbolt 1	10 Gbps	PCIe 2.0	DP 1.1	Mini DisplayPort
Thunderbolt 2	20 Gbps	PCIe 2.0	DP 1.2	Mini DisplayPort
Thunderbolt 3	40 Gbps	PCIe 3.0	DP 1.2	USB-C
Thunderbolt 4	40 Gbps	PCIe 3.0	DP 1.4	USB-C



شکل ۱- مقایسه‌ای بین سرعت نسل‌های مختلف Thunderbolt

## ۱- کاربرد پروتکل Thunderbolt چیست و چرا نیاز به توسعه این پروتکل بود؟

پروتکل Thunderbolt برای انتقال پر سرعت داده، انتقال ویدیو و فناوری شارژ سریع (power delivery) طراحی شده است. از کاربردهای این پروتکل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- انتقال پرسرعت داده: تا سرعت ۴۰ گیگابیت بر ثانیه، پشتیبانی از SSDهای خارجی، حافظه RAID و دستگاه‌های جانبی مختلف
- انتقال همزمان صدا و تصویر: پشتیبانی از تصاویر 4K یا 8K از طریق DisplayPort
- اتصال GPUهای خارجی به دستگاه
- امکان Daisy Chain کردن دستگاه‌های متعدد: اتصال تا ۶ دستگاه به یک پورت بدون هاب اضافه
- فناوری شارژ سریع (power delivery): پشتیبانی تا ۱۰۰ وات انتقال توان برای لپتاپ‌ها و لوازم جانبی
- اتصال جامع در واسطه‌های USB، PCIe و DisplayPort: پشتیبانی از واسطه‌های USB، PCIe و DisplayPort

از دلایل توسعه این پروتکل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- فراهم کردن اتصال جامع پرسرعت: Thunderbolt پروتکل‌های متعدد را در یک اتصال ساده ترکیب می‌کند.
- فراهم کردن سرعت انتقال داده بیشتر: Thunderbolt سرعتی تا ۴۰ گیگابیت بر ثانیه را فراهم می‌کند.
- افزایش کارایی GPUهای خارجی: Thunderbolt امکان اتصال GPUهای خارجی به لپ‌تاپ‌های نازک را فراهم می‌کند.
- کاهش به هم ریختگی کابل‌ها: به جای استفاده از کابل‌های جدا برای برق، ویدیو و داده، Thunderbolt تمام این کاربردها را در یک کابل پیاده‌سازی کرده است.
- فراهم کردن Daisy-Chaining: برخلاف USB، Thunderbolt از اتصال دستگاه‌های متعدد در یک زنجیره پشتیبانی می‌کند و نیاز به هاب و آداپتور را کاهش می‌دهد.

## ۲- اتصالات و مدارات لایه فیزیکی پروتکل Thunderbolt به چه شکل است؟ آیا لایه فیزیکی از سیگنالینگ تفاضلی استفاده می‌کند؟ اتصالات ضروری و اختیاری این پروتکل چیست؟

لایه فیزیکی پروتکل Thunderbolt مسئول سیگنالینگ الکتریکی، انتقال داده و مدیریت اتصال بین دستگاه‌ها است. این لایه واسط‌های PCIe و DisplayPort را در یک واسط یکتا جمع می‌کند و تضمین می‌کند که انتقال پر سرعت داده فراهم شود. لایه فیزیکی پروتکل Thunderbolt از بخش‌های کلیدی زیر تشکیل شده است:

- بخش گیرنده و فرستنده (TX/RX): تبدیل داده دیجیتال به سیگنال الکتریکی و برعکس
- مدار سیگنالینگ تفاضلی: استفاده از سیگنالینگ تفاضلی با ولتاژ کم (LVDS) برای کاهش نویز
- مالتی پلکسرها و دی‌مالتی پلکسرها: برای سوییچ کردن بین سیگنال‌های PCIe، DisplayPort و USB
- واحد مدیریت کلاک: فراهم کردن زمان‌بندی برای انتقال درست داده
- مدار فناوری شارژ سریع: مدیریت تامین برق (تا ۱۰۰ وات بر شارژ کردن دستگاه‌ها)
- واحدهای انکودینگ و دیکودینگ: تبدیل داده به فرمت مناسب برای انتقال

پروتکل Thunderbolt برای انتقال داده پرسرعت و قابل اطمینان از سیگنالینگ تفاضلی استفاده می‌کند. این پروتکل از سیگنالینگ تفاضلی با ولتاژ پایین (Low Voltage Differential Signaling-LVDS) و مدلاسیون Pulse Amplitude (PAM-3) برای افزایش یکپارچگی سیگنال استفاده می‌کند. علت استفاده از سیگنالینگ تفاضلی در این پروتکل، کاهش تداخل‌های الکترومغناطیسی، افزایش مقاومت سیگنال در برابر نویز و تضمین انتقال پرسرعت داده در کابل‌ها طولانی است.

شیوه کار مدار سیگنالینگ تفاضلی در Thunderbolt به صورت زیر است:

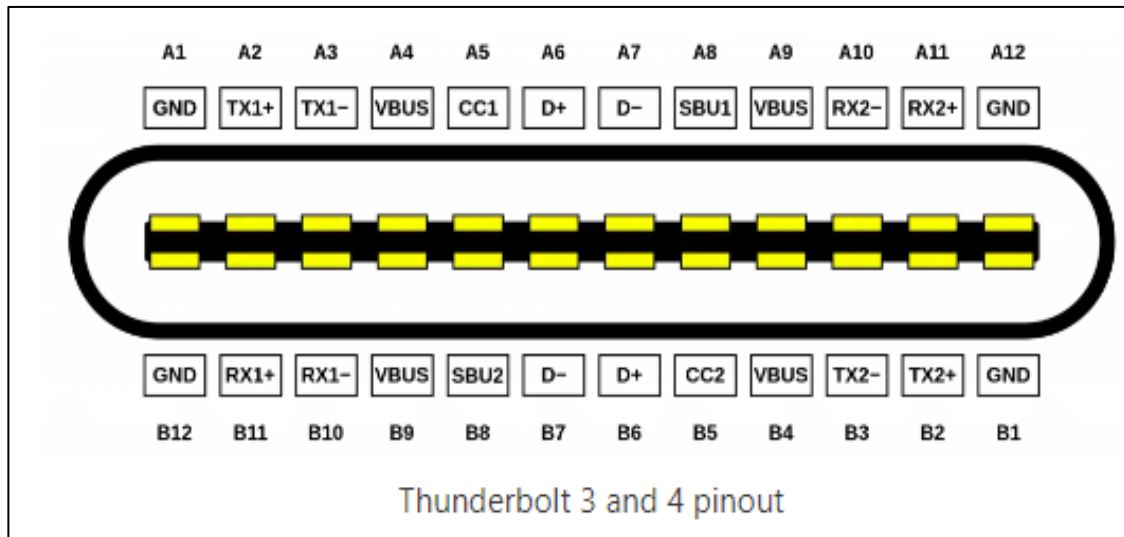
۱. فرستنده دو سیگنال مکمل را روی دو سیم برای گیرنده ارسال می‌کند.
  ۲. گیرنده اختلاف ولتاژ بین دو سیم را محاسبه می‌کند و به عنوان داده در نظر می‌گیرد. ( $V_{diff} = V_+ - V_-$ )
- از آن‌جا که نویز به صورت یکسان روی هر دو سیم اثر می‌گذارد، اختلاف ولتاژ ثابت می‌ماند که باعث مقاوم شدن سیستم به تداخل‌های خارجی و نویز می‌شود.

اتصال‌های Thunderbolt عبارتند از:

- اتصال‌های ضروری

Pin	Function
TX+/TX-	ارسال داده‌ها به صورت تفاضلی
RX+/RX-	دریافت داده‌ها به صورت تفاضلی
GND	اتصال به زمین
Vbus (Power Delivery)	انتقال توان تا ۱۰۰ وات برای شارژ
CC (Configuration Channel)	مدیریت اتصال دستگاه
SBU (Sideband Use)	سیگنال‌های کمکی DisplayPort

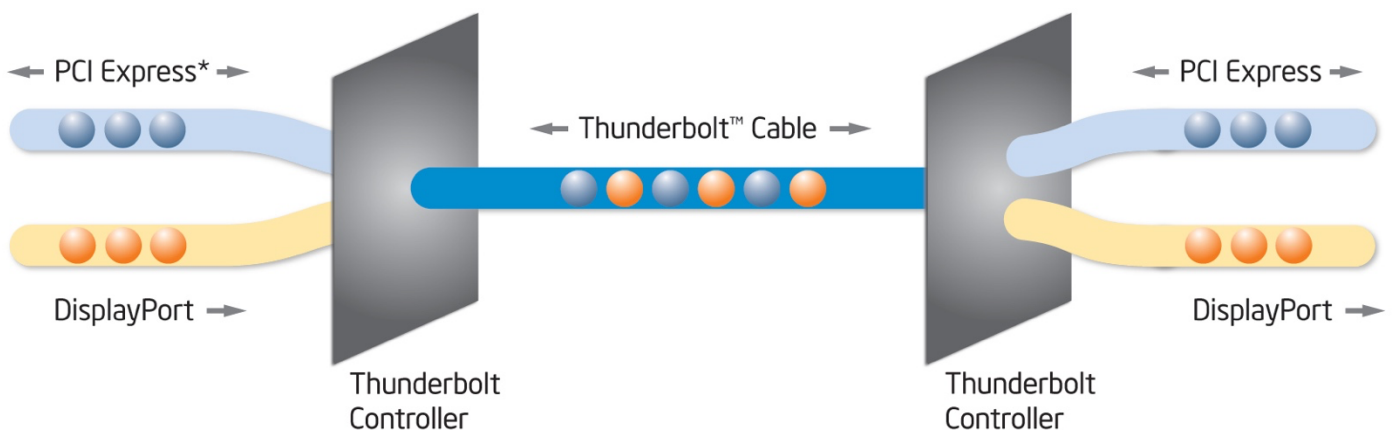
Pin	Function
DP AUX+/AUX-	کانال کمکی اختیاری DisplayPort
USB 2.0 D+/D-	برای پشتیبانی از USB 2.0
Vendor-Specific Pins	استفاده شده برای ویژگی‌های خاص توسط کارخانه سازنده



شکل ۲- نمایی از pinهای 4 و 3 Thunderbolt

### ۳- ارتباط در پروتکل Thunderbolt به صورت سریال است یا موازی؟ نوع انکودینگ این پروتکل چیست؟ روش انتقال آن همزمان است یا ناهمزمان؟

- ارتباط در پروتکل Thunderbolt سریال است. این پروتکل، داده را به صورت پرسرعت در یک فرمت سریال روی جفت سیم‌های تفاضلی می‌کند. دلایل استفاده از ارتباط سریال به جای ارتباط موازی عبارتند از:
- ارتباط سریال در نرخ داده بالا سریع‌تر و بهینه‌تر است.
  - ارتباط موازی دچار clock skew و نویز crosstalk می‌شود که در پروتکل‌های پرسرعت مانند Thunderbolt باعث مشکل‌زا می‌شود.
  - پروتکل Thunderbolt از عمل multiplexing استفاده می‌کند که باعث می‌شود جریان داده‌های مختلف مانند PCIe و DisplayPort بتوانند به صورت همزمان روی یک لینک سریال ارسال شوند.



شکل ۳- انتقال داده به صورت سریال در پروتکل Thunderbolt

نوع انکودینگ در پروتکل Thunderbolt نسل به نسل فرق کرده است:

- Thunderbolt 1 & 2: از انکودینگ 8b/10b استفاده می‌کند.
- Thunderbolt 3: از انکودینگ 128b/130b استفاده می‌کند.
- Thunderbolt 4: از انکودینگ Pulse Amplitude Modulation (PAM-3) استفاده می‌کند.

روش انتقال در پروتکل Thunderbolt به صورت هم‌زمان است. این پروتکل از یک سیگنال کلاک که برای هم‌گام‌سازی دقیق به اشتراک گذاشته می‌شود، استفاده می‌کند. بسته‌های داده با توجه به این سیگنال کلاک تنظیم می‌شوند تا تاخیر را کمینه کنند. دلایل استفاده از انتقال هم‌زمان در این پروتکل عبارتند از:

- تضمین تاخیر پایین و انتقال بی‌درنگ داده‌ها
- اجتناب از ناهماهنگی‌های زمانی در انتقال پرسرعت داده
- ضرورت هم‌زمانی برای دستگاه‌های daisy-chained زمانی که دستگاه‌های متعدد با استفاده از سیگنال کلاک مشترک کار می‌کنند.

#### ۴- آیا پروتکل Thunderbolt را می‌توان جهت چندین دستگاه/ماژول سخت‌افزاری استفاده کرد؟ چالش مدیریت برخورد در این پروتکل چگونه است؟

پروتکل Thunderbolt از اتصال چندین دستگاه پشتیبانی می‌کند. این پروتکل اجازه می‌دهد که دستگاه‌های جانبی متعدد مانند GPUهای خارجی یا دستگاه‌های حافظه به دو صورت به هم متصل شوند:

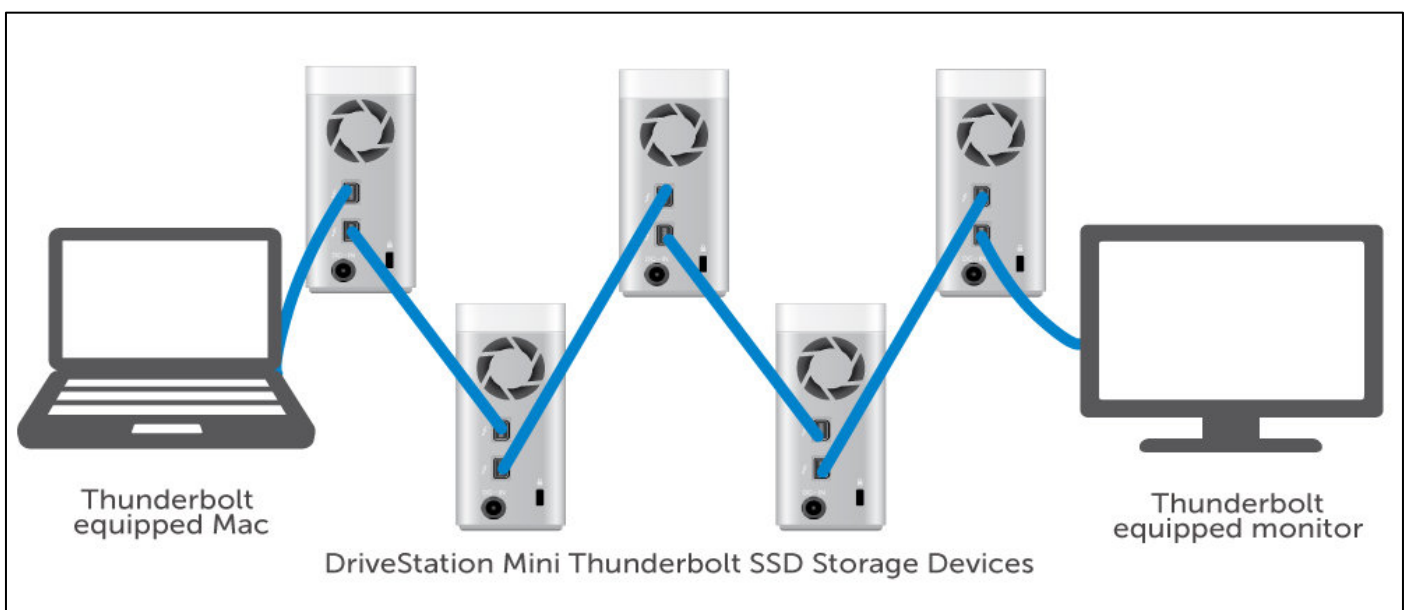
۱. Daisy-Chaining

۲. Hub-Based Connection

الف) Daisy-Chaining: با استفاده از تکنیک Daisy-Chaining، تا ۶ دستگاه می‌توانند با استفاده از یک پورت Thunderbolt در یک زنجیره به هم متصل شوند. در این حالت دستگاه‌ها به صورت سریال به هم متصل می‌شوند به این معنی که هر دستگاه، به دستگاه قبل خود متصل می‌شود. همچنین یک کابل یکتا هر دوی سیگنال‌های PCIe و DisplayPort را منتقل می‌کند.

شیوه کار Daisy-Chaining به صورت زیر است:

- دستگاه میزبان (کامپیوتر) یک کنترلر Thunderbolt دارد.
  - دستگاه اول با استفاده از یک کابل Thunderbolt به میزبان متصل می‌شود.
  - سایر دستگاه‌ها به جای اتصال به میزبان، به دستگاه قبل خود متصل می‌شوند.
- هر دستگاه (بجز دستگاه آخر) لازم است قابلیت انتقال سیگنال‌های Thunderbolt از خود را داشته باشد تا زنجیره کار کند.

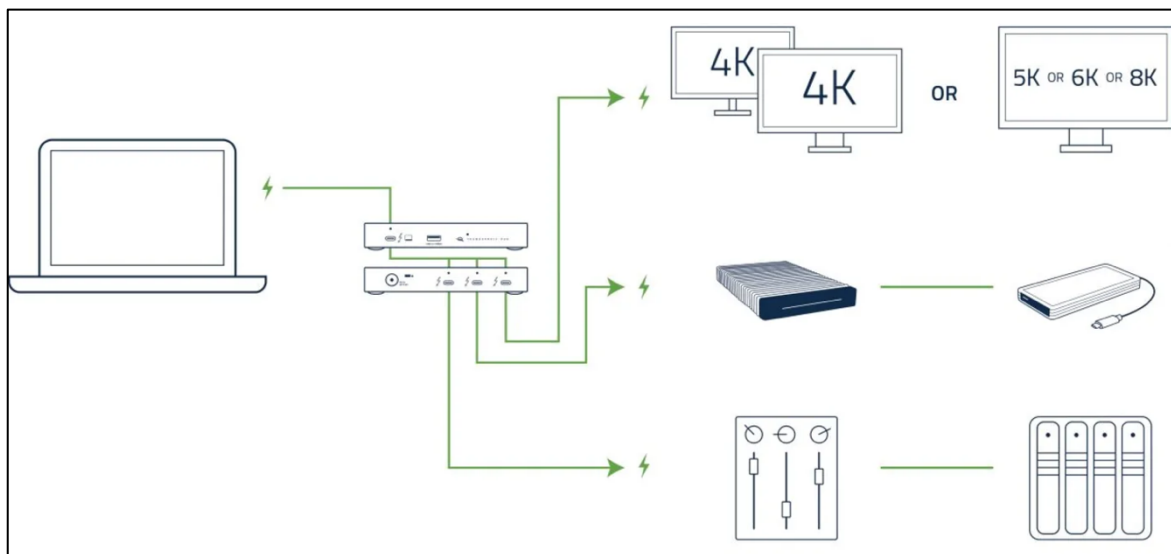


شکل ۴- Daisy-chain در پروتکل Thunderbolt

محدودیت‌های Daisy-Chaining عبارتند از:

- تمامی دستگاه‌ها از Daisy-Chaining پشتیبانی نمی‌کنند.
  - اگر دستگاه در میانه زنجیره از کار بیفتد، تمام دستگاه‌های متصل شده بعد از آن نیز ارتباط خود را از دست می‌دهند.
  - در این حالت پهنای باند بین تمام دستگاه‌ها به اشتراک گذاشته می‌شود که ممکن است باعث کاهش کارایی شود.
- به دنبال مشکلات موجود در روش Daisy-Chaining، در نسل چهارم Thunderbolt از یک شیوه جدید برای اتصال چندین دستگاه استفاده شد.

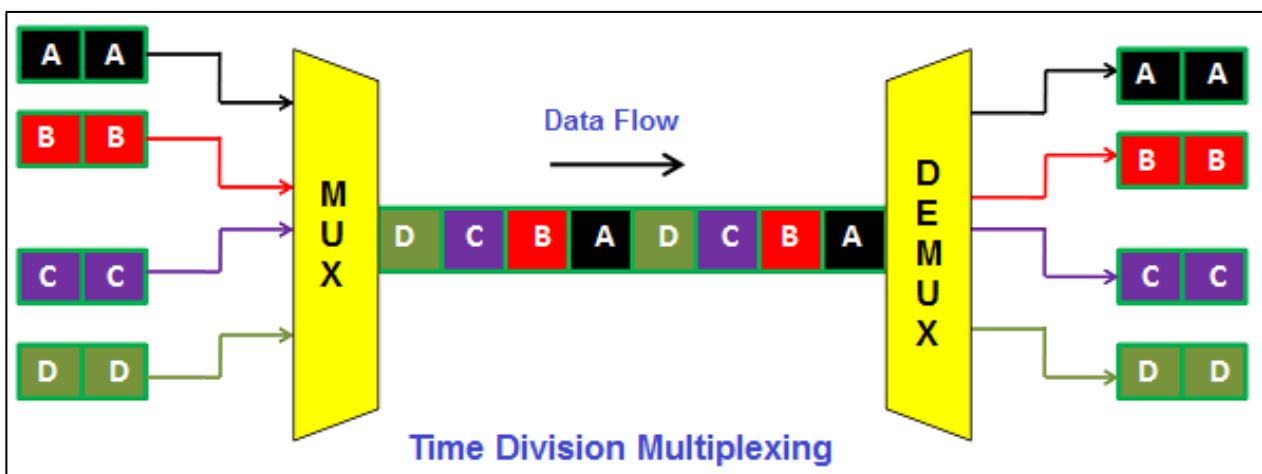
- ب) Hub-Based Connection: در Thunderbolt 4، اتصال چندین دستگاه با استفاده از یک هاب Thunderbolt بهینه‌تر شده است. در این حالت، بر خلاف Daisy-Chaining، هر دستگاه به صورت مستقیم به یک هاب مرکزی متصل می‌شود. تمام دستگاه‌ها بدون تکیه به دستگاه‌های ثبل، به کل پهنای باند دسترسی دارند. مزایای این روش اتصال عبارتند از:
- قابلیت اطمینان بالاتر: در این حالت، با از کار افتادن یک دستگاه، ارتباط سایر دستگاه‌ها قطع نمی‌شود.
  - عدم نیاز به قابلیت انتقال سیگنال‌های Thunderbolt از یک دستگاه
  - تخصیص بهتر پهنای باند



شکل ۵- اتصال Hub-based در پروتکل Thunderbolt

از آن جا که پروتکل Thunderbolt اجازه اتصال چندین دستگاه روی یک لینک را می‌دهد، باید یک شیوه بهینه برای مدیریت برخورد و تخصیص پهنای باند نیز داشته باشد. این پروتکل از تکنیک (TDM) time-division multiplexing برای مدیریت جریان‌های داده مختلف بدون برخورد استفاده می‌کند. در این حالت:

۱. هر دستگاه به صورت پویا درخواست پهنای باند می‌دهد.
۲. کنترلر Thunderbolt با استفاده از سیستم دآوری مرکزی به هر دستگاه (بر حسب اولویت) یک time slot اختصاص می‌دهد تا از انتقال همزمان داده توسط چندین دستگاه جلوگیری کند.



شکل ۶- نمایی از شیوه کار Time Division Multiplexing



## ۵- آدرس دهی و مسیریابی در پروتکل Thunderbolt چگونه است؟

دستگاه‌های Thunderbolt در یک توپولوژی درختی (یا daisy-chain بدون دور) به هم متصل می‌شوند. یک میزبان (مثلاً یک کامپیوتر) به عنوان ریشه درخت قرار می‌گیرد. هر دستگاه Thunderbolt می‌تواند به حداکثر دو دستگاه دیگر متصل شود که اجازه ایجاد یک daisy-chain را می‌دهد. همچنین یک هاب Thunderbolt اجازه اتصال دستگاه‌های متعدد را در یک توپولوژی ستاره‌ای می‌دهد. هر دستگاه Thunderbolt یک سوئیچ درونی دارد که به هدایت کردن بسته‌ها در طول زنجیره کمک می‌کند. هر دستگاه Thunderbolt به صورت خودکار حین اتصال یک شناسه یکتا دریافت می‌کند. شیوه آدرس دهی به صورت سلسله‌مراتبی است: میزبان به هر دستگاه یک Node ID می‌دهد. هر دستگاه در زنجیره یک ID افزایشی بر حسب موقعیت مکانی‌اش دریافت می‌کند. دستگاه‌ها از آدرس مک استفاده نمی‌کنند. مسیریابی با استفاده از Node ID و شماره پورت انجام می‌شود. هر دستگاه Thunderbolt دو پورت با شماره‌های صفر و یک دارد.

مسیریابی در Thunderbolt بیشتر شبیه به یک switching fabric است. هر بسته Thunderbolt یک سرآیند شامل Node ID مقصد، شماره پورت مقصد و نوع پروتکل مقصد (PCIe, DisplayPort, USB, ...) دارد. زمانی که یک دستگاه بسته را دریافت می‌کند، Node ID مقصد را با Node ID خودش تطبیق می‌دهد. در صورت عدم تطابق، بسته را به سمت Node ID مربوطه هدایت می‌کند.

هر دستگاه Thunderbolt یک جدول مسیر دارد که برای دستگاه مشخص می‌کند که بسته‌های ورودی را به کجا بفرستد. این جدول به صورت پویا توسط کنترلر Thunderbolt میزبان در زمان اتصال دستگاه‌ها تشکیل می‌شود. جدول مسیر هر پورت ورودی را به پورت خروجی برای هدایت بسته‌ها نگاشت می‌کند. دستگاه‌ها به صورت خودکار توسط میزبان پیدا می‌شوند و مسیر بهینه مشخص می‌شود.

زمانی که یک دستگاه Thunderbolt جدید وارد می‌شود، میزبان توپولوژی را مجدداً اسکن می‌کند و جدول‌های مسیر را به‌روزرسانی می‌کند. همچنین زمانی که یک دستگاه خارج می‌شود، کنترلر Thunderbolt به صورت خودکار مسیر جدیدی برای ترافیک در نظر می‌گیرد تا اتصال دستگاه‌ها حفظ شود.

هر دستگاه Thunderbolt یک سوئیچ درونی دارد که عمل packet switching را با تاخیر کم انجام می‌دهد. این سوئیچ می‌تواند به صورت پویا بر اساس اینکه کدام پروتکل به داده بیشتری احتیاج دارد، پهنای باند تخصیص دهد.

یکی از ویژگی‌های اصلی Thunderbolt، tunneling است. به این معنی که چندین پروتکل (PCIe, DisplayPort, USB, ...) می‌توانند یک کابل فیزیکی را به اشتراک بگذارند. هر بسته Thunderbolt شامل یک tunnel ID است که مشخص می‌کند این بسته متعلق به کدام پروتکل است. کنترلر Thunderbolt بسته‌ها را در مقصد دی‌مالتی‌پلکس می‌کند.

## ۶- قابلیت مدیریت جریان داده در پروتکل Thunderbolt چگونه است؟

پروتکل Thunderbolt از یک شیوه مدیریت جریان داده بهینه برای تضمین انتقال روان و بدون برخورد داده استفاده می‌کند. از آن جا که این پروتکل جریان داده‌های مختلف مانند PCIe، DisplayPort، USB و ... را منتقل می‌کند، باید یک شیوه بهینه برای مدیریت جریان داده و جلوگیری از ازدحام و از دست رفتن بسته‌ها داشته باشد.

جریان داده در پروتکل Thunderbolt با استفاده از سه روش اصلی مدیریت می‌شود:

- Time-Division Multiplexing (TDM) برای تخصیص پهنای باند
- مدیریت جریان داده بر اساس اعتبار برای PCIe Tunneling
- بافر کردن فریم برای جریان‌های DisplayPort

این روش‌ها تضمین می‌کنند که ترافیک‌های مختلف می‌توانند یک لینک Thunderbolt را به صورت بهینه بدون غرق کردن گیرنده در داده به اشتراک بگذارند.

الف) Time-Division Multiplexing (TDM) برای تخصیص پهنای باند

Thunderbolt با استفاده از TDM پهنای باند را به صورت پویا تخصیص می‌دهد، به این معنی که دستگاه‌های مختلف به نوبت در بازه زمانی مخصوص به خود داده را ارسال می‌کنند. کنترلر Thunderbolt به صورت پیوسته وضعیت استفاده از پهنای باند را بررسی می‌کند و پهنای باند را با توجه به اولویت دستگاه نیاز کنونی داده تخصیص می‌دهد. این روش کارایی تمامی دستگاه‌های متصل را تضمین می‌کند، از اینکه یک دستگاه تمام پهنای باند را استفاده کند اجتناب می‌کند و ترافیک PCIe و DisplayPort و USB را به صورت همزمان بهینه می‌کند.



ب) مدیریت جریان داده بر اساس اعتبار برای PCIe Tunneling از Thunderbolt پشتیبانی می‌کند، از مکانیزم مدیریت جریان داده بر حسب اعتبار PCIe برای مدیریت جریان داده به صورت بهینه استفاده می‌کند.

در این روش، هر دستگاه یک مقدار ثابت اعتبار برای انتقال داده دریافت می‌کند. زمانی که یک دستگاه داده ارسال می‌کند، اعتبار مصرف می‌کند. دستگاه گیرنده داده را دریافت می‌کند و زمانی که پردازش داده را تمام کرد، اعتبار را باز می‌گرداند. اگر اعتبار یک دستگاه تمام شود، باید صبر کند تا اعتبار جدید به او تعلق بگیرد.

این روش از buffer overflow و ازدحام داده در PCIe tunnel جلوگیری می‌کند. همچنین انتقال داده عادلانه بین دستگاه‌های متعدد را تضمین می‌کند و باعث بهبود تاخیر و بهینگی در دستگاه‌ها جانبی پرسرعت می‌شود.

ج) بافر کردن فریم برای جریان‌های DisplayPort و Thunderbolt همچنین DisplayPort Tunneling پشتیبانی می‌کند که نیازمند بافر کردن فریم برای مدیریت داده ویدیویی با کیفیت بالا است.

در این روش، داده تصویری قبل از انتقال به صورت موقت در بافرها ذخیره می‌شود. کنترلر Thunderbolt فضای خالی بافر را بررسی می‌کند و نرخ انتقال فریم را تنظیم می‌کند. اگر بافر با سرعت زیاد پر شود، مکانیزم مدیریت جریان داده سرعت انتقال داده را کاهش می‌دهد تا از دست رفتن فریم‌ها جلوگیری کند.

این روش پخش روان ویدیو بدون وقفه را تضمین می‌کند، از دست رفتن فریم‌ها زمانی که چندین دستگاه فعال هستند، جلوگیری می‌کند و همچنین استفاده از پهنای باند بین جریان‌های داده PCIe و DisplayPort را بهینه می‌کند.

## ۷- نحوه تشخیص خطا در لایه‌های متفاوت پروتکل Thunderbolt چگونه است؟

پروتکل Thunderbolt از مکانیزم تشخیص خطا در لایه‌های مختلف استفاده می‌کند تا یکپارچگی داده را تضمین کند. این مکانیزم‌ها در هر سه لایه physical، data link و transport & protocol وجود دارند. هر لایه از یک تکنیک خاص برای تشخیص خطا استفاده می‌کند تا قابلیت اطمینان در طول tunneling تضمین شود.

### الف) لایه فیزیکی

نویز سیگنال، تداخل‌های الکترومغناطیسی و معیوب بودن کابل انتقال می‌توانند باعث ایجاد خطا در بیت‌ها شوند. از آن‌جا که Thunderbolt از سیگنالینگ تفاضلی استفاده می‌کند، اثر نویز کاهش پیدا می‌کند اما همچنان در این لایه احتیاج به مکانیزم تشخیص خطا می‌باشد.

مکانیزم تشخیص خطا در لایه فیزیکی به شیوه‌های زیر است:

- انکودینگ 8b/10b در Thunderbolt 1 & 2 و انکودینگ 128b/130b در Thunderbolt 3 & 4: در این روش از بیت‌های اضافی برای تشخیص الگوهای نامعتبر بیتی استفاده می‌شود.
- استفاده از Cyclic Redundancy Check (CRC): هر بلوک منتقل شده یک فیلد CRC checksum دارد. گیرنده داده مجدداً CRC را محاسبه می‌کند و با CRC اولیه مقایسه می‌کند و در صورتی عدم مطابقت، خطا تشخیص داده می‌شود.

### ب) لایه data link

از دست رفتن یا تغییر فریم به دلیل buffer overflow، تاخیرهای انتقال یا تداخل از خطاهای ممکن در این لایه هستند. مکانیزم تشخیص خطا در لایه data link به شیوه‌ها زیر است:

- استفاده از CRC برای بسته‌های داده: همان‌طور که در قبل گفته شد، بسته‌های Thunderbolt یک فیلد CRC دارد که به تشخیص خطاهای انتقال کمک می‌کند.
- مکانیزم مدیریت جریان داده: مدیریت جریان داده بر حسب اعتبار تضمین می‌کند که داده تنها زمانی ارسال می‌شود که فضای بافر در دسترس است. این مکانیزم باعث کاهش buffer overflow (که می‌تواند منجر به خراب شدن بسته‌ها شود) می‌شود.

### ج) لایه‌های بالاتر (PCIe, DisplayPort, USB)

در لایه‌های بالاتر، خطا ممکن است به دلایل زیر رخ دهد:

- PCIe tunneling: خطا در تراکنش، خرابی حافظه
- DisplayPort tunneling: از دست رفتن فریم‌ها، خطاهای پیکسل‌ها
- USB tunneling: از دست رفتن بسته‌های داده به دلیل خطاهای پروتکل USB

مکانیزم‌های تشخیص خطا در لایه‌های بالاتر منحصر به شیوه تشخیص خطا در هر یک از پروتکل‌های استفاده از این لایه‌هاست:

- PCIe: استفاده از End-to-End CRC برای تشخیص خطا در بسته‌های PCIe
- DisplayPort: استفاده از frame buffering برای تشخیص فریم‌های از دست رفته و بررسی پیوستگی پخش ویدیو برای تشخیص خطاهای فریم‌ها
- USB: USB tunneling از کدهای تشخیص خطا در لایه انتقال استفاده می‌کند.

## ۸- آیا در پروتکل Thunderbolt رویکردی برای تصحیح خطا هم داریم؟

پروتکل Thunderbolt از مکانیزم‌های تصحیح خطا در کنار تشخیص خطا استفاده می‌کند. اما این پروتکل به صورت ویژه روی تشخیص خطا و ارسال مجدد به جای روش‌های forward error correction (FEC) تمرکز می‌کند.

(الف) لایه فیزیکی

- انکودینگ 8b/10b و 128b/130b: در صورت تشخیص خطاهای بیت، تصحیحی صورت نمی‌گیرد و سیستم درخواست ارسال مجدد را به لایه‌های بالاتر ارسال می‌کند.
- استفاده از CRC: در صورت عدم مطابقت فیلد CRC، داده خراب دور انداخته می‌شود و داده اصلی مجدداً ارسال می‌شود. از آنجا که Thunderbolt پروتکل پرسرعتی است، به جای استفاده از FEC در لایه فیزیکی بر ارسال مجدد سریع داده برای تصحیح خطا تمرکز می‌کند.

(ب) لایه data link

- در این لایه، Thunderbolt از شیوه‌ای به نام Automatin Repeat reQuest (ARQ) برای تصحیح خطا استفاده می‌کند.
- استفاده از CRC: در صورت عدم مطابقت در فیلد CRC: بسته دور انداخته می‌شود و ارسال مجدد صورت می‌گیرد.
  - ارسال مجدد خودکار (ARQ): در صورتی که فریم خرابی تشخیص داده شود، فرستنده به صورت خودکار آن فریم را ارسال می‌کند. این شیوه تضمین می‌کند که گیرنده همیشه داده درست را دریافت می‌کند. از آنجا که پروتکل Thunderbolt پرسرعت و با تاخیر کم است، ارسال مجدد داده سریع و بهینه است.
- در این لایه هم از FEC برای تصحیح خطا استفاده نمی‌شود زیرا این روش باعث افزایش زمان پردازش بسته می‌شود.

(ج) لایه‌های بالاتر: از آنجا که پروتکل Thunderbolt از ترکیب پروتکل‌های مختلفی ایجاد شده است، هر یک از این پروتکل‌ها شیوه تصحیح خطای ویژه خود را دارند. اما باز هم در تمامی این پروتکل‌ها، در صورت تشخیص خطا، بیشتر از روش ارسال مجدد استفاده می‌شود.

## ۹- انواع پیام در پروتکل Thunderbolt به چه صورت هستند؟

ارتباطات در پروتکل Thunderbolt شامل انواع مختلف پیام است. این پیام‌ها در بین لایه‌های مختلف شامل لایه فیزیکی، لایه data link و لایه انتقال منتقل می‌شوند. انواع پیام در این پروتکل عبارتند از:

- پیام‌های کنترلی
- پیام‌های داده
- پیام‌های مدیریت خطا

(الف) پیام‌های کنترلی

پیام‌های کنترلی برای مدیریت و پیکربندی لینک Thunderbolt استفاده می‌شوند. این پیام‌ها شامل دست‌دهی اولیه، تنظیم اولیه لینک و نگهداری لینک هستند.

انواع پیام‌ها:

- پیام‌های تنظیم اولیه لینک: این پیام‌ها حین آغاز ارتباط برای پیکربندی لینک استفاده می‌شوند.
- پیام‌های نگهداری لینک: این پیام‌های برای مدیریت وضعیت لینک (مانند بالا بودن یا پایین بودن لینک) استفاده می‌شوند.
- Hot Plug Events: این پیام‌ها در زمان اضافه شدن یا خارج شدن یک دستگاه استفاده می‌شوند.
- پیام‌های مدیریت توان: این پیام‌ها برای مدیریت وضعیت توان دستگاه استفاده می‌شوند.

فرمت کلی پیام‌های کنترلی در پروتکل Thunderbolt به صورت زیر است:

Message Type (8 bits)	نوع پیام کنترلی را مشخص می‌کند
Message Length (8 bits)	طول پیام به بایت
Message Data (Variable)	داده مربوط به نوع پیام
Checksum (32 bits)	بررسی خطا برای حفظ یکپارچگی

(ب) پیام‌های داده  
پیام‌های داده اطلاعات کاربر را در طول اتصال Thunderbolt منتقل می‌کنند. این پیام‌ها بیشتر با استفاده از پروتکل‌های PCIe، DisplayPort و USB منتقل می‌شوند.  
انواع پیام‌ها:

- PCIe Data Messages: این پیام‌های برای انتقال داده از میزبان به دستگاه‌های جانبی و برعکس استفاده می‌شوند.
  - DisplayPort Data Messages: این پیام‌ها برای انتقال سیگنال‌های ویدیو استفاده می‌شوند.
  - USB Data Messages: این پیام‌ها برای انتقال بسته‌های داده USB استفاده می‌شوند.
  - Isochronous Data: این پیام‌ها برای جریان‌های داده حساس به زمان مانند صدا یا تصویر استفاده می‌شوند.
- پیام‌های داده عموماً در بسته‌های لایه انتقال قرار می‌گیرند و فرمت کلی آن‌ها به صورت زیر است:

Header (32 bits)	شامل اطلاعات کنترلی (مانند آدرس مبدا و مقصد، نوع داده)
Payload (Variable)	داده در حال انتقال (مانند داده USB، DisplayPort، PCIe)
Checksum (32 bits)	بررسی خطا برای حفظ یکپارچگی

(ج) پیام‌های مدیریت خطا  
پیام‌های مدیریت خطا برای مدیریت خطاها در سیستم مانند خرابی داده یا اشکال در انتقال داده استفاده می‌شود. این پیام‌ها تضمین می‌کنند که سیستم می‌تواند از طریق درخواست ارسال مجدد و تنظیم پیکربندی‌ها، خطاها را تصحیح کند.  
انواع پیام‌ها:

- تشخیص خطا: پیام‌هایی مانند فریم خراب یا بسته نامعتبر که نشان‌دهنده خطا هستند.
- بهبودی از خطا: پیام‌هایی که درخواست ارسال مجدد داده خراب یا از دست رفته را دارند.
- مدیریت جریان داده: پیام‌هایی که جریان داده را برای اجتناب از ازدحام و وقوع خطا مدیریت می‌کنند.

پیام‌های خطا معمولاً ساده هستند و اطلاعات کافی را برای آن که گیرنده مشکل را بفهمد و اقدام به رفع آن کند، فراهم می‌کند. فرمت کلی پیام‌های خطا به صورت زیر است:

Error Type (8 bits)	نوع خطا را مشخص می‌کند (مانند خطای CRC، تایم‌اوت)
Error Details (Variable)	جزئیات خطا (ID بسته، جریان داده تحت تاثیر)
Action (8 bits)	عمل بازبینی پیشنهادی (ارسال مجدد، نادیده گرفتن)

- <https://www.intel.com/content/dam/doc/technology-brief/thunderbolt-technology-brief.pdf>
- [https://www.thunderbolttechnology.net/sites/default/files/Thunderbolt3\\_TechBrief\\_FINAL.pdf](https://www.thunderbolttechnology.net/sites/default/files/Thunderbolt3_TechBrief_FINAL.pdf)
- <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/upgrade-gaming-accessories-thunderbolt-4.html>
- [https://www.thunderbolttechnology.net/sites/default/files/Thunderbolt\\_3\\_Overview\\_Brief\\_FINAL.pdf](https://www.thunderbolttechnology.net/sites/default/files/Thunderbolt_3_Overview_Brief_FINAL.pdf)
- [https://www.erpublications.com/uploaded\\_files/download/download\\_01\\_04\\_2014\\_11\\_41\\_43.pdf](https://www.erpublications.com/uploaded_files/download/download_01_04_2014_11_41_43.pdf)
- [https://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/hd3ss0001.pdf?ts=1738578627921&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/hd3ss0001.pdf?ts=1738578627921&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)