

## پروتکل (CXL) Compute Express Link

با پیشرفت روزافزون فناوری، پردازش داده‌ها در مقیاس بزرگ‌تر و با سرعت بالاتری انجام می‌شود. اما یکی از مشکلات اساسی این است که پردازنده‌های مدرن به شدت به حافظه و منابع محاسباتی جانبی مثل GPU، FPGA و DPU وابسته‌اند. این دستگاه‌ها برای پردازش وظایف پیچیده نیاز به انتقال داده‌های زیاد بین یکدیگر دارند، اما فناوری‌های سنتی مانند PCIe دیگر جوابگوی این نیاز نیستند.

CXL (Compute Express Link) پاسخی به این چالش است. این فناوری یک استاندارد ارتباطی جدید و پیشرفته است که امکان اتصال سریع، کم‌تأخیر و بهینه بین پردازنده‌های مرکزی (CPU)، شتاب‌دهنده‌ها و حافظه‌های جانبی را فراهم می‌کند. به زبان ساده، CXL اجازه می‌دهد که دستگاه‌های مختلف بدون نیاز به کپی‌های مکرر داده، به حافظه مشترک دسترسی داشته باشند و پردازش‌ها را سریع‌تر انجام دهند.

چرا CXL مورد نیاز است؟

در مراکز داده و سرورهای پردازشی، سه مشکل اساسی وجود دارد:

### 1. اختلاف سرعت بین حافظه‌ها

در سرورها، حافظه RAM مثل DRAM به پردازنده نزدیک است و سرعت دسترسی به آن بسیار بالاست، اما وقتی ظرفیت آن پر شود، سیستم مجبور می‌شود داده‌ها را در حافظه‌های کندتر مثل SSD ذخیره کند. این اختلاف سرعت بین حافظه‌ها باعث افزایش تأخیر در پردازش‌ها می‌شود.

### 2. رشد نامتعادل تعداد هسته‌ها و پهنای باند حافظه

پردازنده‌های جدید تعداد هسته‌های بیشتری دارند، اما تعداد کانال‌های ارتباطی بین پردازنده و حافظه‌های اصلی به همان نسبت افزایش پیدا نکرده است. این یعنی برخی از هسته‌ها منتظر دریافت داده می‌مانند و کارایی پردازنده کاهش پیدا می‌کند.

### 3. حافظه‌های بلااستفاده در شتاب‌دهنده‌ها

در پردازش‌های سنگین، GPUها و شتاب‌دهنده‌ها حافظه اختصاصی خودشان را دارند، اما در برخی مواقع مقدار زیادی از این حافظه استفاده نمی‌شود، درحالی‌که CPU ممکن است به حافظه بیشتری نیاز داشته باشد CXL. اجازه می‌دهد این حافظه‌ها به اشتراک گذاشته شوند و سیستم به‌صورت منعطف‌تر از منابع استفاده کند.

## CXL چگونه کار می کند؟

CXL به عنوان یک پل ارتباطی هوشمند بین پردازنده و دستگاه های جانبی عمل می کند و دارای سه پروتکل اصلی است:

1. CXL.io عملکردی شبیه PCIe دارد و برای عملیات استاندارد ورودی/خروجی (I/O) استفاده می شود.
  2. CXL.cache اجازه می دهد شتاب دهنده ها مثل GPU بتوانند داده ها را مستقیماً از حافظه پردازنده بخوانند و کش کنند، بدون نیاز به انتقال های مکرر داده.
  3. CXL.memory امکان دسترسی مستقیم پردازنده به حافظه های جانبی مثل DRAM یا حافظه های پایدار (Persistent Memory) را فراهم می کند.
- 

## دستگاه های سازگار با CXL

CXL در سه نوع دستگاه استفاده می شود:

- نوع 1: شتاب دهنده هایی که حافظه داخلی ندارند، مثل Smart NIC این دستگاه ها از حافظه CPU استفاده می کنند.
  - نوع 2: دستگاه هایی مثل GPU، FPGA و ASIC که هم حافظه داخلی دارند و هم می توانند به حافظه پردازنده دسترسی داشته باشند.
  - نوع 3: حافظه های جانبی که به سیستم متصل می شوند و ظرفیت حافظه را افزایش می دهند.
- 

## تفاوت CXL با PCIe چیست؟

CXL روی همان زیرساخت PCIe 5.0 و 6.1 ساخته شده، اما تفاوت های کلیدی با PCIe دارد:

به زبان ساده، PCIe فقط داده ها را جابه جا می کند، اما CXL مدیریت هوشمندتری روی حافظه انجام می دهد و این باعث افزایش کارایی پردازنده و شتاب دهنده ها می شود.

---

ویژگی	CXL	PCLe
اشتراک گذاری حافظه نهان	دارد	ندارد
دسترسی مستقیم به حافظه	دارد	ندارد
تاخیر	کم	زیاد
پشتیبانی از هوش مصنوعی	دارد	ندارد

نسخه‌های CXL و ویژگی‌های جدید آن‌ها

### CXL 2.0

- پشتیبانی از Memory Pooling امکان اشتراک گذاری حافظه بین چند پردازنده را فراهم می‌کند.
- افزایش امنیت و رمزگذاری داده‌ها برای جلوگیری از حملات سایبری.
- دسترسی هم‌زمان چند پردازنده به حافظه مشترک یک حافظه می‌تواند به 16 پردازنده مختلف متصل شود.

### CXL 3.1

- افزایش پهنای باند انتقال داده‌ها با سرعت 64 گیگاترنسفر بر ثانیه.
- ارتقای Memory Pooling امکان دسترسی چندین پردازنده به یک حافظه مشترک بدون نیاز به راه‌اندازی مجدد سرور.
- ارتقای مقیاس‌پذیری اتصال چندین سوئیچ برای ایجاد شبکه‌های پیچیده‌تر و مقیاس‌پذیرتر.

CXL چگونه امنیت داده‌ها را تأمین می‌کند؟

با افزایش حملات سایبری، CXL مکانیزم‌های امنیتی سخت‌افزاری را برای محافظت از داده‌ها ارائه می‌دهد. برخی از این ویژگی‌ها شامل:

- رمزگذاری AES-GCM 256 بیتی برای حفاظت از داده‌های در حال انتقال.
  - مکانیزم‌های ضد حمله فیزیکی و بازپخش داده‌ها Replay Protection.
  - احراز هویت سخت‌افزاری برای اطمینان از صحت ارتباطات بین دستگاه‌ها.
- 

چرا CXL آینده معماری‌های پردازشی را تغییر می‌دهد؟

- افزایش سرعت پردازش داده‌ها CXL به پردازنده‌ها و شتاب‌دهنده‌ها اجازه می‌دهد بدون نیاز به جابه‌جایی داده‌ها، از حافظه‌های مشترک استفاده کنند.
  - بهینه‌سازی مصرف حافظه، اگر نیازی به تخصیص بیش از حد حافظه برای هر دستگاه وجود ندارد، بلکه حافظه بین پردازنده‌ها دینامیک مدیریت می‌شود.
  - پشتیبانی از هوش مصنوعی و HPC افزایش ظرفیت حافظه و کاهش تأخیر، باعث بهبود عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های پیچیده می‌شود.
  - بهینه‌سازی هزینه مراکز داده، با کاهش تعداد حافظه‌های بلااستفاده و افزایش بهره‌وری سخت‌افزار، هزینه‌های سرورهای پردازشی کاهش می‌یابد.
-

## جدول خلاصه ی ویژگی ها:

ویژگی	توضیحات
پروتکل های اصلی	شامل CXL.io مدیریت I/O مشابه PCIe و CXL.cache و CXL.memory
مدیریت حافظه	امکان اشتراک گذاری حافظه بین چندین پردازنده و شتاب دهنده به جای اختصاص جداگانه به هر دستگاه
تأخیر کم (Latency)	کاهش چشمگیر تأخیر در ارتباط بین CPU ، GPU و حافظه نسبت به PCIe
پشتیبانی از چند نوع دستگاه	قابل استفاده برای شتاب دهنده ها GPU ، FPGA ، DRAM ASIC ، حافظه های پایدار و Smart NIC ها
افزایش پهنای باند	استفاده از لایه فیزیکی PCIe 5.0 و 6.1 برای انتقال داده با سرعت تا 64 GT/s در CXL 3.1
سازگاری با PCIe	استفاده از همان رابط فیزیکی PCIe اما با پروتکل های پیشرفته برای مدیریت بهتر حافظه و پردازش داده
بهینه سازی مصرف حافظه	کاهش نیاز به کپی برداری داده ها و افزایش کارایی استفاده از حافظه های موجود در سیستم
پشتیبانی از امنیت پیشرفته	استفاده از Integrity and Data Encryption (IDE) برای حفاظت از داده های در حال انتقال
کاهش هزینه مراکز داده	با بهینه سازی استفاده از منابع پردازشی و کاهش حافظه های بلااستفاده، هزینه های سخت افزاری کاهش می یابد
قابلیت پردازش بدون نیاز به جابه جایی داده ها	شتاب دهنده ها می توانند داده ها را مستقیماً از حافظه پردازنده پردازش کنند بدون نیاز به انتقال اضافی
ارتقای عملکرد در هوش مصنوعی	به دلیل افزایش پهنای باند و کاهش تأخیر، CXL بهینه ترین راهکار برای پردازش های سنگین مانند AI و یادگیری ماشین است
قابلیت دسترسی چند میزبان	در نسخه CXL 2.0 و بالاتر، امکان اتصال تا 16 پردازنده مختلف به یک حافظه مشترک

## ساختار لایه‌ای CXL

CXL دارای سه لایه فیزیکی، لینک و پروتکل است که به شکل زیر سازماندهی شده‌اند:

### لایه فیزیکی (Physical Layer)

✓ نقش اصلی:

این لایه مسئول انتقال بیت‌های داده از طریق مسیر PCIe است CXL. از همان لایه فیزیکی PCIe 5.0 و 6.1 برای ارسال و دریافت داده‌ها استفاده می‌کند.

✓ ویژگی‌های کلیدی:

سرعت بالا

### سازگاری با PCIe

- اگر یکی از دو دستگاه در ارتباط CXL را پشتیبانی نکند، ارتباط در حالت PCIe استاندارد انجام می‌شود.

### قابلیت سوئیچ بین CXL و PCIe

- سیستم ابتدا ارتباط را با PCIe شروع می‌کند و در صورت پشتیبانی هر دو دستگاه، به CXL تغییر می‌یابد.

لینک‌های پرسرعت و مسیرهای دوطرفه

- CXL می‌تواند ارتباط همزمان دوطرفه را برای دسترسی سریع‌تر به حافظه فراهم کند.

---

### لایه لینک (Link Layer)

نقش اصلی:

این لایه مسئول کنترل جریان داده‌ها، مدیریت ارتباط و تضمین یکپارچگی داده‌های ارسال شده است.

ویژگی‌های کلیدی:

### مدیریت بسته‌های داده‌ای Packet Handling

- CXL به جای بسته‌های داده‌ای استاندارد PCIe، از بسته‌های داده‌ای بهینه‌شده برای ارتباط کم‌تأخیر استفاده می‌کند.

## کنترل جریان داده و تصحیح خطا Error Correction

- قابلیت تشخیص و اصلاح خطا برای افزایش پایداری ارتباط بین CPU و شتابدهنده‌ها.

## امنیت و رمزگذاری Integrity & Encryption

- در CXL 2.0 و 3.1، Integrity and Data Encryption (IDE) اضافه شده تا ارتباطات بین پردازنده و حافظه‌های CXL در برابر حملات سایبری محافظت شوند.

---

## لایه پروتکل (Protocol Layer)

نقش اصلی:

این لایه شامل پروتکل‌های اصلی CXL است که ارتباط بین CPU، شتابدهنده‌ها و حافظه را کنترل می‌کند.

سه پروتکل اصلی:

CXL.io مدیریت ورودی/خروجی (I/O) و عملیات استاندارد ارتباط.

CXL.cache امکان دسترسی سریع شتابدهنده‌ها به کش پردازنده بدون نیاز به کپی داده‌ها.

CXL.memory امکان دسترسی مستقیم پردازنده.

هر نوع دستگاه CXL از ترکیب متفاوتی از این پروتکل‌ها استفاده می‌کند:

- دستگاه‌های نوع 1: CXL.io + CXL.cache
- دستگاه‌های نوع 2: CXL.io + CXL.cache + CXL.memory
- دستگاه‌های نوع 3: CXL.io + CXL.memory

---

## نتیجه‌گیری

CXL یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌های فناوری در حوزه پردازش و مدیریت حافظه در مراکز داده است.

این فناوری با ارائه اتصال کم‌تأخیر، بهینه‌سازی حافظه و بهبود امنیت، راهکاری ایده‌آل برای پردازش‌های سنگین و پیچیده محسوب می‌شود. با افزایش پشتیبانی شرکت‌های بزرگ از CXL، انتظار می‌رود که این فناوری در آینده به استاندارد اصلی در مراکز داده و پردازش ابری تبدیل شود.