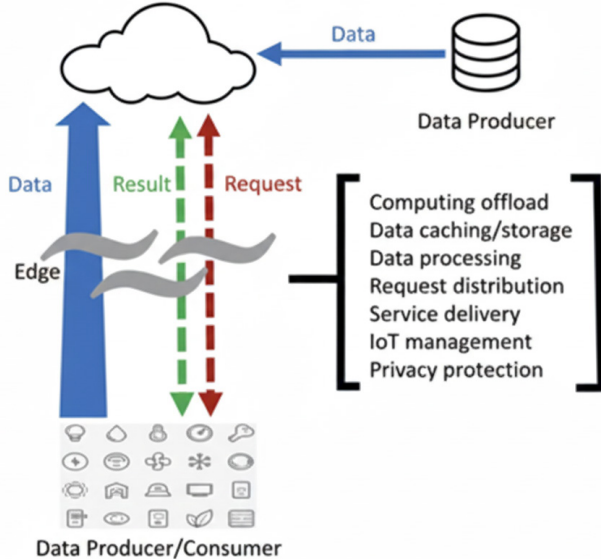


**محمدحسین نورمحمدیان**  
 دانشجو مهندسی کامپیوتر  
 دانشکده فابریک دانشگاه تهران  
 hosein86noori@gmail.com



## Edge Computing

دقیقه ۱۱



Edge computing paradigm.

### چرا خودروهای خودران نمی‌توانند صبر کنند؟

فناوری خودروهای خودران (Self-driving car) اولین بار در سال ۱۹۸۷ در آلمان تحت پروژه VaMoRs، پس از توسعه هوش و بینایی ماشین در سال ۱۹۸۰، برای اولین بار در یک خودرو به کار گرفته شد.

تکنولوژی خودروهای خودران وابسته به تحلیل پیوسته داده‌های ورودی از طریق دوربین‌ها، رادارها (GPS)، لیدارها (LiDAR) و... است؛ حسگرهایی که در هر ثانیه چندین گیگابایت داده تولید می‌کنند. این داده‌ها باید شناسایی (Detection)، دسته‌بندی (Classification) و دنبال‌گیری (Tracking) شوند تا خودرو بتواند تصمیم‌های حیاتی را در بهترین زمان بگیرد؛ برای مثال تغییر مسیر یا ترمز گرفتن.

**Oops:** اگر برای پردازش داده‌ها از سرورهای ابری استفاده کنیم، تأخیر شبکه به‌علت فرستادن داده‌ها به دیتاسنتر برای پردازش و تحلیل، باعث کندی تصمیم‌گیری می‌شود. شاید این تأخیر تنها چند میلی‌ثانیه باشد، اما هنگامی که سرعت خودرو ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت است، این تأخیر به‌معنی پیمودن چندین متر اضافه و وقوع فاجعه است.

**Tip:** برای جلوگیری از این تأخیر، در رایانش لبه‌ای توانایی پردازش را به "لبه" شبکه، یعنی مستقیماً به واحد مرکزی خودرو (ECU)، آوردند و امکان تصمیم‌گیری بی‌درنگ (Real-time) را فراهم کردند.

رایانش لبه‌ای (Edge Computing) یکی از فناوری‌های کلیدی در دنیای دیجیتال امروز است که با انتقال توان پردازش از رایانش ابری (Cloud) به نزدیکی منبع تولید داده، سرعت، کارایی، امنیت و حریم خصوصی سیستم هوشمند (مانند: Self-driving car، IOT، Industry 4.0 و...) را افزایش می‌دهد.

خودروهای خودران (Self-driving car) برای تصمیم‌گیری فوری و ایمن در کسری از ثانیه به حجم عظیمی از داده‌های حسی (Sensor Data) نیاز دارند. سیستم‌های رایانش ابری سنتی به دلیل تأخیر (Latency) بالا توانایی تأمین و پردازش این اطلاعات در زمان مطلوب را ندارند؛ به همین دلیل، یکی از حوزه‌های اصلی بهره‌برداری از فناوری رایانش لبه‌ای، خودروهای خودران هستند که نیازمند پردازش و تصمیم‌گیری بی‌درنگ (Real-time) و دقیق در محیط‌های دائماً در حال تغییر و پویا هستند.

### داستان رایانش لبه‌ای (Edge Computing)

روزی روزگاری، همه چیز در دنیای فناوری باید از ابر (Cloud) می‌گذشت. همه چیز خوب پیش می‌رفت تا اینکه دنیا بسیار سریع‌تر و هوشمندتر شد. اینجا بود که ابر با برخی معایب روبه‌رو شد:

۱- حجم داده‌ها بیش از حد زیاد شد.

۲- تأخیر (Latency) زیاد بود.

۳- امنیت و حریم خصوصی دچار مشکل شد.



Fig. 1. Cloud computing paradigm.

در این زمان بود که بحث رایانش لبه‌ای مطرح شد؛ ایده آن پردازش داده‌ها در نزدیکی منبع تولید داده‌ها بود. در نتیجه:

۱- سرعت افزایش یافت.

۲- مصرف پهنای باند کمتر شد.

۳- به دلیل جابه‌جایی کمتر داده‌ها، امنیت بیشتر شد.

البته به‌وجود آمدن رایانش لبه‌ای به معنای منسوخ شدن یا کنار گذاشته شدن ابر نبود؛ بلکه رایانش لبه‌ای در واقع نوعی مکمل برای ابر به حساب می‌آید.

## ۲- بهینه‌سازی ارتباطات و پهنای باند:

با وجود رایانش لبه‌ای، همچنان خودرو در برخی مواقع نیاز دارد با Cloud ارتباط برقرار کند (مثلاً برای به‌روزرسانی مدل‌های هوش مصنوعی یا نقشه‌ها). این ارتباط دوطرفه میان لبه و ابر برقرار است.

پردازشگرهای لبه داده‌هایی مانند داده‌های آموزشی (Training Data)، اطلاعات سیستم و عملکرد (System & Performance Data) و داده‌های نقشه‌برداری و محیطی (Mapping & Environmental Data) را به ابر ارسال می‌کنند.

اما نکته مهم این است که داده‌ها فیلتر می‌شوند؛ داده‌های اضافی و بی‌اهمیت حذف و فقط محور داده‌ها (Metadata) یا اطلاعات حیاتی ارسال می‌شوند. این امر باعث صرفه‌جویی عظیم در پهنای باند می‌شود.

## ۳- امنیت و حریم خصوصی (Security & Privacy):

### ۳-۱- امنیت سایبری (Cybersecurity):

هر خودرو خودران یک شبکه کوچک است. یکی از نکات اصلی در طراحی معماری لبه‌ها، تضمین ایمن بودن سیستم‌های حیاتی در برابر حملات سایبری (Hack) است. این کار با استفاده از رمزنگاری (Encryption) قوی برای ارتباطات، احراز هویت چندعاملی و سیستم‌های تشخیص نفوذ قابل طراحی است.

### ۳-۲- حفظ حریم خصوصی:

تحلیل تصاویر و داده‌های مسافران می‌تواند در داخل خودرو انجام شود و تنها نتایج کلی و ناشناس به بیرون ارسال گردد. این امر حریم خصوصی سرنشینان را حفظ می‌کند.

## از مشکلات برام بگو...

چالش‌های این فناوری در خودروهای خودران را می‌توانیم به چهار گروه اصلی تقسیم کنیم:

### ۱- محدودیت منابع و سخت‌افزار:

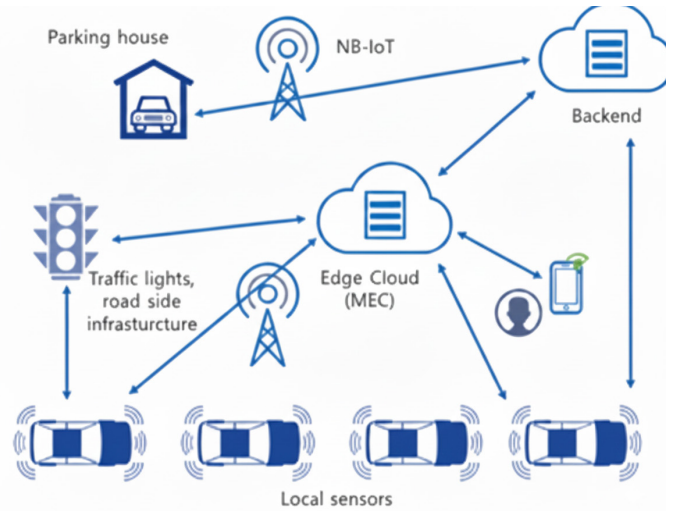
خودروها نسبت به مراکز داده توان محاسباتی، حافظه و انرژی محدودی دارند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق و بینایی ماشین نیاز به GPU/TPU قوی دارند که در خودرو ممکن است پرهزینه و داغ شوند.

نیاز به تعادل بین مصرف انرژی، حرارت (Thermal Management) و کارایی وجود دارد.

### ۲- چالش‌های ارتباطی:

ارتباط میان خودرو و زیرساخت (V2I) یا خودرو به خودرو (V2V) همیشه پایدار نیست.

در مناطقی با پوشش ضعیف شبکه، انتقال داده‌ها از لبه ممکن است مختل شود.



## از لبه خودرو چه خبر؟

موفقیت خودروهای خودران وابسته به طراحی معماری خاصی از رایانش‌های لبه‌ای در چندین حوزه است:

### ۱- مدیریت تأخیر (Latency Management):

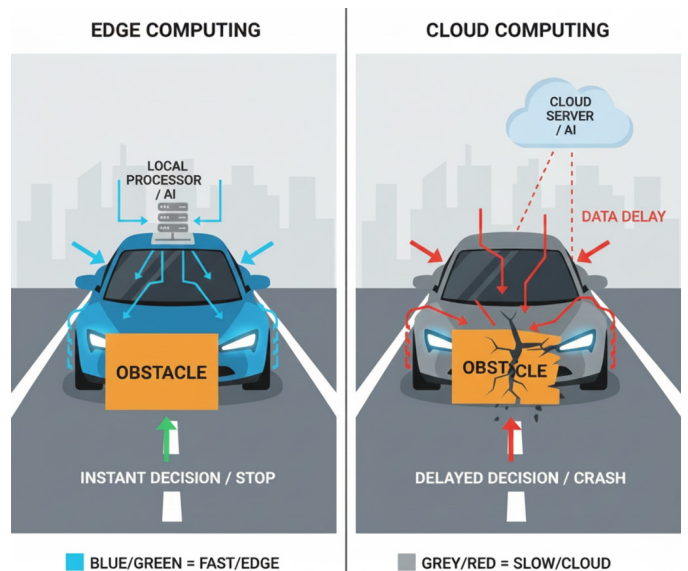
معماری‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری این بخش باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند میلیون‌ها دستور را در ثانیه پردازش کنند:

#### ۱-۱- سخت افزار لبه:

استفاده از واحدهای پردازش گرافیکی (GPUs) و تراشه‌های شتاب‌دهنده هوش مصنوعی (AI Accelerators) که به‌طور خاص برای اجرای مدل‌های یادگیری عمیق (Deep Learning) با مصرف انرژی و فضای محدود طراحی شده‌اند.

#### ۲-۱- سیستم عامل بی‌درنگ (RTOS):

در بخش نرم‌افزار، سیستم‌عامل‌های سنتی برای تصمیم‌گیری‌های حیاتی مناسب نیستند؛ به همین دلیل از RTOS ها استفاده می‌شود تا مطمئن شویم وظایف حیاتی در زمان تضمین‌شده اجرا می‌شوند.



توسعه استانداردهای جهانی برای رایانش لبه‌ای در خودروهای خودران، کلید موفقیت گسترش این فناوری خواهد بود.



## سخن آخر...

رایانش لبه‌ای نقش حیاتی در تحقق خودروهای خودران ایمن، کارآمد و قابل اعتماد ایفا می‌کند. با انتقال قدرت پردازش به نزدیکی منبع داده، این فناوری چالش‌های اساسی مانند تأخیر، پهنای باند و حریم خصوصی را مرتفع می‌سازد. با وجود چالش‌های فنی موجود، پیشرفت‌های سریع در زمینه سخت‌افزار، الگوریتم‌ها و شبکه‌های ارتباطی، آینده‌ای روشن برای این حوزه نوید می‌دهد.

موفقیت در این حوزه نیازمند پیشرفت‌های مداوم در معماری سیستم‌های توزیع‌شده، الگوریتم‌های هوش مصنوعی پهنه‌شده برای سخت‌افزار لبه و پروتکل‌های امنیتی بی‌درنگ است؛ که همگی از زمینه‌های اصلی فعالیت و تخصص مهندسان کامپیوتر محسوب می‌شوند.

## منابع:

[1] "The Emergence of Edge Computing", IEEE Computer 50(1):30-39, 2017. Mahadev Satyanarayanan

[2] Edge computing use cases: Eight ways organizations are leveraging edge computing by Phill Powell and Ian Smalley

تأخیر (Latency) شبکه می‌تواند بر تصمیم‌گیری بی‌درنگ اثر منفی بگذارد.

### ۳- امنیت و حریم خصوصی:

داده‌های حسگرها (مثل دوربین، LiDAR و GPS) بسیار حساس هستند.

پردازش داده در لبه باعث می‌شود سطح حمله (Attack Surface) گسترده‌تر شود.

تهدیداتی مانند دستکاری داده‌ها، نفوذ به سیستم و حملات DDoS می‌توانند فاجعه‌بار باشند.

### ۴- هماهنگی بین لبه و ابر:

باید تصمیم گرفته شود چه داده‌هایی به صورت محلی (در خودرو) پردازش شوند و چه داده‌هایی به ابر ارسال شوند.

اگر تعادل بین پردازش محلی و ابری به خوبی طراحی نشود، ممکن است: تأخیر افزایش یابد، مصرف پهنای باند زیاد شود، یا داده‌های مهم از دست بروند.

## آنچه خواهید دید...

نسل بعدی رایانش‌های لبه‌ای در خودروها شامل همکاری لبه‌ای (Collaborative Edge) خواهد بود؛ جایی که خودروهای نزدیک به هم از طریق شبکه‌های V2X داده‌های خود را به اشتراک می‌گذارند تا تصویر کامل‌تر و ایمن‌تری از محیط داشته باشند.

## NEXT-GEN AUTOMOTIVE EDGE COMPUTING COLLABORATIVE VXX NETWORKS



VXX (VEHICLE-TO-EVERYTHING) = SECURE WIRELESS COMMUNICATION  
 SHARED DATA = SENSORS + INTEL FROM OTHER VEHICLES  
 RESULT = FASTER DECISION-MAKING & CRASH PREVENTION

در آینده، خودروهای خودران بخشی جدایی‌ناپذیر از اکوسیستم شهرهای هوشمند خواهند بود و رایانش لبه‌ای نقش کلیدی در هماهنگی بین خودروها، زیرساخت‌های شهری و سایر سیستم‌ها ایفا می‌کند.