جزوه هوش مصنوعی در مهندسی عمران

استاد سیدامیرحسین حسینی

۱. هوش مصنوعی در عمران چیست؟

هوش مصنوعی به مهندس عمران کمک می‌کند تا از داده‌هایی مانند **نتایج آزمایش مصالح، عکس‌های کارگاه، قرائت حسگرهای پل، گزارش‌های اجرایی و سوابق ترافیک** برای تشخیص وضعیت، پیش‌بینی یا مقایسه گزینه‌ها استفاده کند.

برای مثال، یک سامانه می‌تواند بخش‌های مشکوک به ترک را در تصاویر پل مشخص کند. **یافتن ناحیه مشکوک کار سامانه است؛ تشخیص نوع و علت ترک، ارزیابی اهمیت آن و تصمیم درباره تعمیر، کار مهندس است.**

۲. منظور از «انواع هوش» چیست؟

برای پاسخ دقیق، باید سه دسته‌بندی متفاوت را از هم جدا کنیم:

دسته‌بندی	سؤال اصلی	دسته‌ها و مثال‌ها	ارتباط با عمران
دامنه توانایی هوش مصنوعی	سامانه چند نوع کار را می‌تواند انجام دهد؟	هوش مصنوعی محدود، عمومی و ابرهوش	بیشتر ابزارهای عملی عمران برای وظایف مشخص به‌کار می‌روند؛ مانند تشخیص ترک یا پیش‌بینی مقاومت بتن. هوش عمومی و ابرهوش مفاهیمی هستند که نباید کاربردهای معمول عمرانی را به آن‌ها نسبت داد.
روش‌ها و حوزه‌های هوش مصنوعی	سامانه چگونه مسئله را حل می‌کند؟	یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، بینایی ماشین، پردازش زبان و خبره، سیستم هر مسئله عمرانی، بسته به داده و خروجی موردنیاز، با یک هوش روش یا ترکیبی از چند روش حل می‌شود. مولد	
توانایی‌های انسانی	مهندس برای انجام کار به چه توانایی‌هایی نیاز دارد؟	منطقی‌ـریاضی، دیداری‌ـفضایی، کلامی و بین‌فردی	تحلیل سازه، نقشه‌خوانی، گزارش‌نویسی و مدیریت کارگاه به توانایی‌های متفاوتی نیاز دارند.

پاسخ کلیدی: عمران زیرمجموعه یک نوع هوش نیست. اگر منظور **توانایی‌های انسانی** باشد، هوش منطقی‌ـریاضی و دیداری‌ـفضایی در تحلیل و طراحی برجسته‌اند؛ اگر منظور **فناوری** باشد، نوع هوش مصنوعی را خودِ مسئله تعیین می‌کند.

۳. انواع روش‌های هوش مصنوعی و کاربردشان در عمران

روش یا حوزه	کارکرد به زبان ساده	نمونه کاربرد عمرانی
یادگیری نظارت‌شده	مدل از مثال‌هایی یاد می‌گیرد که جواب آن‌ها مشخص است.	با استفاده از طرح‌های اختلاط و نتایج آزمایشگاهی، مقاومت فشاری ۲۸روزه بتن را **تخمین** می‌زند.
یادگیری بدون نظارت	مدل در داده‌هایی که برچسب ندارند، الگو یا رفتار غیرعادی پیدا می‌کند.	قرائت‌های غیرمعمول حسگرهای پل را برای بررسی بیشتر علامت‌گذاری می‌کند. غیرعادی بودن الزاماً به معنی آسیب سازه‌ای نیست.
یادگیری تقویتی	سامانه با آزمودن تصمیم‌ها و دریافت پاداش یا جریمه، راهبردی برای تصمیم‌های پی‌درپی یاد می‌گیرد.	در محیط شبیه‌سازی، زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی را برای کاهش انتظار خودروها می‌آموزد.
یادگیری عمیق	شبکه‌های عصبی چندلایه از داده‌های پیچیده، مانند تصویر، الگو استخراج می‌کنند.	نواحی مشکوک به ترک یا پوسته‌شدگی بتن را در تصاویر مشخص می‌کند.
بینایی ماشین	اطلاعات کاربردی را از تصویر و ویدئو استخراج می‌کند.	تصاویر دوره‌ای کارگاه را برای کمک به پایش پیشرفت اجرا بررسی می‌کند.
سیستم خبره و منطق فازی	سیستم خبره از قواعد تخصصی استفاده می‌کند؛ منطق فازی کمک می‌کند مفاهیم درجه‌دار مانند «خرابی کم، حجم ترافیک، متوسط یا زیاد» بیان شوند.	به اولویت‌بندی بازدید یا تعمیر کمک می‌کند.
پردازش زبان طبیعی	اطلاعات را از متن استخراج یا دسته‌بندی می‌کند.	از گزارش‌های روزانه کارگاه، مواردی مانند تأخیر، توقف کار یا کمبود مصالح را بیرون می‌کشد.
هوش مصنوعی مولد	متن، تصویر، کد یا گزینه‌های اولیه تولید می‌کند.	پیش‌نویس گزارش بازدید یا چک‌لیست کنترل کیفیت می‌سازد؛ اطلاعات و استنادهای آن باید بررسی شوند.

این دسته‌ها هم‌سطح و جدا از هم نیستند. **یادگیری عمیق زیرمجموعه یادگیری ماشین است، اما بینایی ماشین یک حوزه کاربردی است.** بنابراین یک سامانه تشخیص ترک می‌تواند هم‌زمان «بینایی ماشین»، «یادگیری عمیق» و، اگر با تصاویر برچسب‌خورده آموزش دیده باشد، «یادگیری نظارت‌شده» باشد.

٤. هر گرایش عمران بیشتر از کدام روش استفاده می‌کند؟

گرایش یا حوزه کاری	مسئله نمونه	روش مناسب برای شروع
سازه و نگهداری پل	علامت‌گذاری ترک در عکس و بررسی تغییر غیرمعمول در داده‌های حسگر	بینایی ماشین برای عکس؛ تشخیص ناهنجاری برای داده حسگر
مصالح و فناوری بتن	تخمین مقاومت یا کارایی بتن از مشخصات طرح اختلاط	یادگیری نظارت‌شده، به‌ویژه مدل‌های پیش‌بینی عددی
ژئوتکنیک	تخمین نشست یا برخی ویژگی‌های خاک از داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی	یادگیری ماشین در کنار تحلیل مکانیک خاک؛ نه به‌جای آن
راه و روسازی	دسته‌بندی خرابی سطح راه و اولویت‌بندی تعمیر	بینایی ماشین برای تشخیص خرابی؛ سیستم خبره یا منطق فازی برای اولویت‌بندی
حمل‌ونقل و ترافیک	پیش‌بینی حجم تردد یا تنظیم زمان چراغ‌ها	مدل‌های سری زمانی برای پیش‌بینی؛ یادگیری تقویتی برای بررسی کنترل تطبیقی در شبیه‌سازی
آب و منابع آب	پیش‌بینی دبی رودخانه یا شناسایی الگوی غیرعادی مصرف	یادگیری ماشین روی داده‌های زمانی مانند بارش و دبی
مدیریت ساخت	ارزیابی احتمال تأخیر، پایش پیشرفت و مرور گزارش‌ها	یادگیری ماشین برای پیش‌بینی، بینایی ماشین برای تصاویر و پردازش زبان برای گزارش‌ها

اشتباه رایج: مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (**BIM**)، تحلیل اجزای محدود و استفاده از پهپاد، به‌خودی‌خود هوش مصنوعی نیستند. مثلاً پهپاد می‌تواند از پل عکس بگیرد؛ **تحلیل خودکار آن عکس‌ها برای علامت‌گذاری ترک، بخش هوش مصنوعی فرایند است.**

۵. مثال مرحله‌به‌مرحله: بازرسی تصویری پل

فرض کنید هدف این است که گروه نگهداری بداند کدام بخش‌های یک پل باید زودتر بازدید شوند.

۱. **تعریف خروجی:** سامانه روی عکس، نواحی مشکوک به ترک را علامت می‌زند؛ قرار نیست ایمنی پل را تأیید کند.

۲. **آماده‌سازی داده:** از بخش‌های مختلف پل در نور و زاویه‌های متفاوت عکس تهیه می‌شود. کارشناس نمونه‌های ترک و موارد مشابه، مانند درز یا لکه، را بررسی و برچسب‌گذاری می‌کند.

۳. **انتخاب روش:** اگر فقط وجود ترک در یک عکس مهم باشد، **طبقه‌بندی تصویر** کافی است. اگر محل یا محدوده ترک مهم باشد، باید از **مکان‌یابی یا قطعه‌بندی تصویر** استفاده کرد.

٤. **آزمون مدل:** عکس‌های آزمون باید جدا از عکس‌های آموزش باشند. بهتر است عکس‌های یک ناحیه یا عکس‌های تقریباً یکسان در هر دو مجموعه قرار نگیرند؛ وگرنه نتیجه آزمون ممکن است بیش از حد خوش‌بینانه باشد.

۵. **تصمیم مهندسی:** مهندس موارد علامت‌خورده را با بازدید میدانی، سوابق سازه و در صورت نیاز اندازه‌گیری تکمیلی بررسی می‌کند. در این کاربرد، **ترکی که مدل ندیده** می‌تواند مهم‌تر از یک هشدار اشتباه باشد؛ پس نباید فقط به درصد کلی پاسخ‌های درست نگاه کرد.

٦. نقش توانایی‌های انسانی در مهندسی عمران

اگر «انواع هوش» را به معنای توانایی‌های انسان در نظر بگیریم، ارتباط آن‌ها با عمران چنین است:

- **منطقی‌ـریاضی:** تحلیل نیروها، محاسبه بار، متره و برآورد، و مقایسه گزینه‌های طراحی.
- **دیداری‌ـفضایی:** نقشه‌خوانی، تصور هندسه سه‌بعدی سازه و تشخیص تداخل اجزا در مدل.
- **کلامی:** گزارش‌نویسی، تنظیم صورت‌جلسه و توضیح یافته‌های فنی برای کارفرما.
- **بین‌فردی:** هماهنگی میان طراح، پیمانکار و ناظر و مدیریت اختلاف‌های کارگاهی.
- **حرکتی و عملی:** کار با تجهیزات نقشه‌برداری، نمونه‌گیری مصالح و انجام اندازه‌گیری میدانی.

این تقسیم‌بندی برای توضیح تنوع مهارت‌های شغلی مفید است، نه برای اینکه هر مهندس را در یک گروه ثابت قرار دهیم.

۷. تمرین کوتاه با پاسخ

مسئله: برای ۲۰۰ نمونه بتن، نسبت آب به سیمان، مقدار اجزای طرح اختلاط و نتیجه آزمایش مقاومت ۲۸روزه ثبت شده است. می‌خواهیم مقاومت یک طرح اختلاط جدید را تخمین بزنیم.

- **ورودی مدل:** مشخصات طرح اختلاط.
- **خروجی مدل:** مقاومت فشاری ۲۸روزه، بر حسب مگاپاسکال.
- **نوع روش:** یادگیری نظارت‌شده، چون پاسخ نمونه‌های قبلی مشخص است؛ و **رگرسیون**، چون خروجی یک عدد است.
- **معیار ساده ارزیابی:** میانگین قدرمطلق اختلاف بین مقاومت پیش‌بینی‌شده و مقاومت آزمایشگاهی، بر حسب مگاپاسکال.
- **محدودیت:** اگر طرح جدید با مصالح یا نسبت‌هایی ساخته شود که با نمونه‌های آموزشی تفاوت زیادی دارند، پیش‌بینی ممکن است معتبر نباشد. مدل جایگزین آزمایش و کنترل پذیرش بتن نیست.

جمع‌بندی امتحانی

برای انتخاب روش، اول بپرسید **داده چیست و خروجی چه باید باشد؟** تصویر ترک ← بینایی ماشین؛ تخمین عددی مقاومت ← رگرسیون؛ قرائت غیرمعمول حسگر ← تشخیص ناهنجاری؛ استخراج اطلاعات از گزارش ← پردازش زبان؛ تهیه پیش‌نویس گزارش ← هوش مولد. در همه این موارد، **هوش مصنوعی ابزار کمک به تصمیم است و کنترل آیین‌نامه‌ای، اعتبارسنجی و تصمیم نهایی بر عهده مهندس است.**

ابزار	برای چه کاری در عمران امتحانش کنم؟	نمونه درخواست
ChatGPT	جزوه‌نویسی، توضیح مفاهیم و طراحی تمرین کلاسی	«تفاوت تشخیص ترک با ارزیابی ایمنی پل را به زبان ساده توضیح بده و یک سؤال امتحانی با پاسخ بنویس.»
Gemini (جیمینای)	کار با عکس و متن در یک گفت‌وگو؛ به‌خصوص اگر فایل‌هایت را در گوگل نگه می‌داری	«در این عکس پل، فقط نشانه‌های قابل مشاهده را فهرست کن. بگو چه چیزهایی از عکس معلوم نیست و چه مواردی باید در بازدید میدانی بررسی شود.»
Grok (گروک)	پیدا کردن سرنخ از بحث‌ها و نمونه‌های منتشرشده در شبکه اجتماعی X، در نسخه‌ای که به آن دسترسی دارد	«نمونه‌هایی از کاربرد پهپاد در بازرسی پل پیدا کن. پست شبکه اجتماعی را از گزارش رسمی یا مقاله جدا کن.»
Claude (کلود)	بازنویسی و مرتب‌کردن گزارش‌های طولانی	«این یادداشت‌های بازدید را به سه بخش مشاهدات، موارد نیازمند بررسی و اقدامات پیشنهادی تبدیل کن. هیچ عدد یا مشاهده‌ای اضافه نکن.»
NotebookLM	پرسش‌وپاسخ بر اساس فایل‌هایی که خودت به آن می‌دهی	«فقط بر اساس این دو PDF، روش‌های بازرسی پل را مقایسه کن و برای هر نکته به قسمت مربوط در منبع ارجاع بده.»

یک مثال که تفاوت ابزارها را روشن می‌کند

فرض کن موضوع ارائه‌ات «**تشخیص ترک پل با هوش مصنوعی**» است. با ChatGPT می‌توانی **متن جزوه و تمرین کلاسی** بسازی؛ با Gemini می‌توانی **یک عکس نمونه را بررسی کنی و درباره نشانه‌های قابل مشاهده سؤال بپرسی**؛ و با NotebookLM می‌توانی **توضیحات جزوه را با مقاله‌هایی که بارگذاری کرده‌ای تطبیق بدهی**. اگر دنبال نمونه‌های تازه برای شروع تحقیق باشی، Grok می‌تواند سرنخ بدهد، اما پست شبکه اجتماعی را نباید جای منبع فنی گذاشت.

نکته جزوه: گروک، جیمینای، کلود و ChatGPT نمونه‌های **دستیار هوش مصنوعی مولد** هستند. اما سامانه‌ای که روی عکس پل **محل ترک را به‌طور خودکار مشخص می‌کند**، نمونه‌ای از **بینایی ماشین** است. یک دستیار گفت‌وگویی می‌تواند به تو درباره عکس توضیح بدهد، ولی این با اندازه‌گیری معتبر ترک یا تأیید ایمنی پل فرق دارد.

عنوان، هدف و مخاطبان جزوه

عنوان درس: هوش مصنوعی در مهندسی عمران

سطح: مقدماتی دانشگاهی

پیش‌نیاز: آشنایی مقدماتی با آمار و مفاهیم عمرانی؛ برنامه‌نویسی برای مطالعهٔ جزوه الزامی نیست.

مخاطبان: دانشجویان عمران، مهندسان ناظر، کارشناسان نگهداری زیرساخت و مدیران پروژه‌های عمرانی.

این جزوه به سه سؤال پاسخ می‌دهد: **هوش مصنوعی چه انواعی دارد؟ هر گرایش عمران از کدام روش‌ها استفاده می‌کند؟ برای کارهایی مانند جزوه‌نویسی، بررسی عکس یا مطالعهٔ PDF، گروک بهتر است، جیمینای یا ابزار دیگری؟**

هدف، حفظ کردن نام الگوریتم‌ها نیست. در پایان باید بتوانی یک مسئلهٔ واقعی را به زبان داده تعریف کنی: **چه اطلاعاتی داریم، چه خروجی می‌خواهیم، خطا چه پیامدی دارد و تصمیم نهایی با چه کسی است؟**

تمام اعداد مثال‌ها آموزشی‌اند؛ آن‌ها را به‌عنوان حدود پذیرش، الزامات ایمنی یا مقادیر آیین‌نامه‌ای به کار نبر.

هوش مصنوعی در عمران چیست؟

هوش مصنوعی به مجموعه‌ای از روش‌ها گفته می‌شود که با استفاده از داده، قواعد یا ترکیبی از آن‌ها، کارهایی مانند **تشخیص الگو، پیش‌بینی، پیشنهاد گزینه و تولید محتوا** را انجام می‌دهند. در عمران، این روش‌ها به بررسی حجم زیادی از اطلاعات کمک می‌کنند؛ اطلاعاتی که ممکن است در عکس، نقشه، گزارش، نتایج آزمایش یا قرائت حسگر پراکنده باشند.

فرض کن شهرداری هزاران عکس از سطح زیرین پل‌ها دارد. بازبینی تک‌تک عکس‌ها زمان می‌برد. یک مدل می‌تواند ابتدا عکس‌هایی را که نشانه‌ای شبیه ترک دارند، جلوتر در صف بازبینی قرار دهد. اما از روی همان عکس لزوماً نمی‌تواند **عمق، علت یا اهمیت سازه‌ای ترک** را مشخص کند.

تفاوت مهم این است: **مدل اطلاعات را برای تصمیم آماده می‌کند؛ مهندس تصمیم را با شواهد کافی می‌گیرد.**

هوش مصنوعی با اتوماسیون و نرم‌افزار مهندسی چه فرقی دارد؟

هر کاری که رایانه سریع انجام می‌دهد، هوش مصنوعی نیست. اگر یک فایل اکسل حجم بتن را با فرمول طول × عرض × ضخامت حساب کند، یک محاسبهٔ خودکار انجام داده است. اگر نرم‌افزار تحلیل سازه پاسخ یک مدل را با حل معادلات فیزیکی به دست آورد،

این فرایند به‌خودی‌خود یادگیری ماشین نیست. اگر یک مدل از سوابق بتن‌ریزی یاد بگیرد چه ترکیبی از شرایط معمولاً با تأخیر همراه است، با نمونه‌ای از یادگیری ماشین روبه‌رو هستیم.

نمونه	ماهیت اصلی
محاسبهٔ حجم پی از روی ابعاد	محاسبهٔ قطعی
تحلیل جابه‌جایی سازه با اجزای محدود	شبیه‌سازی مهندسی
عکاسی از عرشه با پهپاد	گردآوری داده
تشخیص خودکار ناحیهٔ مشکوک در عکس	بینایی ماشین
پیش‌نویس گزارش از روی یادداشت‌ها	هوش مصنوعی مولد

این ابزارها رقیب هم نیستند. پهپاد داده می‌گیرد، مدل تصویر را غربال می‌کند و مهندس نتیجه را با بازدید و تحلیل فنی می‌سنجد

انواع هوش مصنوعی از نظر دامنهٔ توانایی

۱. هوش مصنوعی محدود یا تخصصی: سامانه‌ای که برای کار مشخص یا مجموعه‌ای معین از کارها استفاده می‌شود. مدل تشخیص چاله، پیش‌بینی مقاومت بتن یا دسته‌بندی خرابی روسازی نمونه‌های کاربردی این دسته‌اند.

۲. هوش مصنوعی عمومی: مفهومی برای سامانه‌ای با توانایی یادگیری و انتقال مهارت در طیف وسیعی از مسائل، به شکلی انعطاف‌پذیر و قابل قیاس با توانایی عمومی انسان. اینکه یک دستیار بتواند دربارهٔ بتن، حمل‌ونقل و مدیریت پروژه متن بنویسد، به معنای برخورداری از صلاحیت عمومی برای تصمیم‌گیری در این حوزه‌ها نیست.

۳. ابرهوش: مفهومی عمدتاً نظری برای توانایی‌هایی فراتر از انسان در طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های شناختی. این اصطلاح روش اجرایی برای پروژه‌های عمرانی امروز نیست.

نتیجه: وقتی دربارهٔ یک پروژه حرف می‌زنیم، به‌جای پرسیدن «این ابزار چقدر باهوش است؟» بپرسیم «در این وظیفه، با این داده‌ها و تحت چه شرایطی ارزیابی شده است؟»

۲.۱ توانایی‌های انسانی در کار عمرانی

در یک پروژهٔ عمرانی چند توانایی به‌صورت هم‌زمان به کار می‌آیند: توانایی منطقی‌ـریاضی برای تحلیل نیرو، محاسبه و برآورد؛ توانایی دیداری‌ـفضایی برای خواندن نقشه و تصور سازهٔ سه‌بعدی؛ توانایی زبانی برای گزارش‌نویسی؛ توانایی میان‌فردی برای هماهنگی گروه‌ها؛ و مهارت عملی برای کار میدانی و نمونه‌گیری. این‌ها توصیف‌هایی از مهارت‌اند، نه دسته‌بندی قطعی افراد. مهندس عمران به ترکیبی از آن‌ها نیاز دارد.

۲.۲ دسته‌بندی هوش مصنوعی بر پایهٔ دامنه

هوش مصنوعی محدود برای یک یا چند وظیفهٔ مشخص طراحی می‌شود؛ مانند شناسایی ناحیهٔ مشکوک در تصویر یا تخمین مقاومت بتن. بیشتر کاربردهای فعلی عمران از همین جنس‌اند. «هوش عمومی مصنوعی» و «ابرهوش» اصطلاح‌هایی برای توانایی‌های بسیار گسترده‌ترند و نباید آن‌ها را به نرم‌افزارهای معمول طراحی یا چت‌بات‌ها نسبت داد.

۲.۳ دسته‌بندی بر پایهٔ روش

یادگیری ماشین از داده الگو می‌آموزد؛ یادگیری عمیق نوعی یادگیری ماشین مبتنی بر شبکه‌های عصبی چندلایه است؛ بینایی ماشین با تصویر و ویدئو کار می‌کند؛ پردازش زبان طبیعی متن را تحلیل می‌کند؛ و هوش مولد متن، تصویر یا کد تازه می‌سازد. سیستم خبره قواعد تخصصی را اجرا می‌کند و منطق فازی برای بیان مفاهیمی با مرزهای تدریجی، مانند خرابی کم یا زیاد، مفید است.

پس «عمران در کدام هوش است؟» پاسخ واحدی ندارد: عمران رشته‌ای است که می‌تواند از روش‌های گوناگون استفاده کند. انتخاب به مسئله، داده و خروجی موردنیاز وابسته است.

روش‌ها و فناوری‌های هوش مصنوعی؛ از یادگیری ماشین تا هوش مولد

در یادگیری نظارت‌شده، نمونه‌های آموزشی همراه با جواب درست در اختیار مدل‌اند. اگر ورودی‌ها مشخصات طرح اختلاط و جواب مقاومت فشاری باشد، مدل می‌آموزد مقاومت را تخمین بزند. چون خروجی عددی است، این مسئله «رگرسیون» است؛ اگر خروجی یکی از برچسب‌های سالم، ترک‌خورده یا پوسته‌شده باشد، مسئله «طبقه‌بندی» است.

در یادگیری بدون نظارت، جواب‌های برچسب‌خورده نداریم و مدل به دنبال گروه‌بندی یا ناهنجاری می‌گردد. برای نمونه، قرائت غیرعادی حسگر پل را علامت می‌زند؛ اما ناهنجاری الزاماً به معنای آسیب نیست و می‌تواند ناشی از خطای حسگر یا تغییر دما باشد. یادگیری تقویتی با آزمودن تصمیم‌های پیاپی و پاداش یا جریمه کار می‌کند؛ زمان‌بندی چراغ‌ها را می‌توان ابتدا در شبیه‌سازی بررسی کرد.

بینایی ماشین می‌تواند تصویر را طبقه‌بندی کند، محل یک عیب را کادر بگیرد یا پیکسل‌های متعلق به ترک را جدا کند. پردازش زبان می‌تواند از گزارش روزانهٔ کارگاه، تأخیرها یا کمبود مصالح را استخراج کند. هوش مولد برای تولید پیش‌نویس، توضیح مفاهیم، نوشتن کد اولیه و ساخت تمرین به کار می‌آید؛ اما ممکن است پاسخ قانع‌کننده و نادرست بسازد.

این نام‌ها هم‌سطح نیستند: یادگیری عمیق زیرمجموعهٔ یادگیری ماشین است و بینایی ماشین حوزهٔ کاربردی است. یک سامانهٔ تشخیص ترک ممکن است هم بینایی ماشین باشد، هم یادگیری عمیق و هم یادگیری نظارت‌شده. پهپاد، BIM، سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی و تحلیل اجزای محدود به‌خودی‌خود هوش مصنوعی نیستند؛ هوش مصنوعی زمانی وارد می‌شود که الگوریتم داده را برای تشخیص، پیش‌بینی یا تصمیم‌یار تحلیل کند.

کاربرد هوش مصنوعی در شاخه‌های مهندسی عمران

در سازه و نگهداری، تحلیل تصویر می‌تواند نواحی مشکوک به ترک، خوردگی یا پوسته‌شدگی را برای بازبینی علامت بزند؛ دادهٔ حسگرها نیز برای رصد تغییر رفتار و تشخیص قرائت‌های نامعمول به کار می‌رود. در نمونهٔ پروژهٔ آزمایشی وزارت حمل‌ونقل ایالات متحده در چهار شهرستان کانزاس، داده‌های پهپادی پل‌ها با هوش مصنوعی پردازش و در بستر GISتلفیق شد؛ گزارش از به‌کارگیری مدل تشخیص شیء YOLOv11برای شناسایی خودکار آسیب اجزای پل سخن می‌گوید. این نمونه، ابزار غربالگری و پشتیبان بازرسی است، نه جایگزین تأیید مهندس بازرسی گزارش USDOT، صفحات ۲ و ۵.

در مصالح، مدل‌های رگرسیون از داده‌های آزمایشگاهی برای تخمین مقاومت یا کارایی مخلوط استفاده می‌کنند؛ نتیجه فقط در محدودهٔ داده‌های آموزش قابل اتکاست. در ژئوتکنیک، مدل می‌تواند از داده‌های گمانه و آزمایش، تخمین اولیهٔ نشست یا ویژگی خاک بدهد، اما جایگزین بررسی زمین‌شناسی، طراحی و ضوابط ژئوتکنیکی نیست.

در راه و روسازی، بینایی ماشین خرابی سطح را دسته‌بندی می‌کند و سامانهٔ تصمیم‌یار می‌تواند با شدت خرابی، اهمیت مسیر و منابع تعمیر، اولویت بازدید را پیشنهاد دهد. در حمل‌ونقل، مدل سری زمانی حجم تردد را پیش‌بینی می‌کند و یادگیری تقویتی ممکن است زمان‌بندی چراغ را در شبیه‌سازی بهینه کند. در آب، داده‌های بارش و دبی برای پیش‌بینی یا هشدار الگوهای غیرعادی بررسی می‌شوند. در مدیریت ساخت، تحلیل متن و داده‌های برنامه می‌تواند به پایش تأخیر، ایمنی، مصرف مصالح و پیشرفت کمک کند؛ ولی تعریف دقیق پیشرفت و کیفیت داده همچنان تعیین‌کننده است.

مثال‌های حل‌شده و گردش‌کار مهندسی

۵.۱ مثال ۱ :تخمین مقاومت بتن

فرض کنید برای نمونه‌های قبلی، نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان و افزودنی و مقاومت ۲۸روزه ثبت شده است. ورودی مدل، مشخصات مخلوط و خروجی، مقاومت بر حسب مگاپاسکال است؛ بنابراین مسئله یادگیری نظارت‌شده و رگرسیون است. داده‌ها را به آموزش و آزمون جدا می‌کنند، ترجیحاً به‌گونه‌ای که نمونه‌های یک بچ یا شرایط تقریباً یکسان در هر دو بخش پخش نشوند. خطای میانگین قدرمطلق، میانگین فاصلهٔ پیش‌بینی از آزمایش را نشان می‌دهد. مدل فقط تخمین است: مخلوط تازه یا مصالح متفاوت ممکن است بیرون از محدودهٔ دادهٔ آموزش باشد و پذیرش بتن همچنان نیازمند آزمایش و ضوابط پروژه است.

۵.۲ مثال ۲ :عکس‌برداری از پل

هدف را محدود تعریف کنید: «علامت‌گذاری نواحی مشکوک برای بازدید»، نه «اعلام ایمنی پل». تصاویر باید از زوایا، فاصله‌ها و نورهای متنوع جمع‌آوری و توسط فرد آشنا با بازرسی برچسب‌گذاری شوند. اگر فقط وجود ترک در عکس مهم باشد، طبقه‌بندی کافی است؛ اگر محل عیب مهم باشد، تشخیص شیء یا قطعه‌بندی مناسب‌تر است. تصاویر نزدیک به هم یا متعلق به یک بخش پل نباید هم‌زمان

در آموزش و آزمون قرار گیرند، زیرا نتیجه را بیش از حد خوش‌بینانه می‌کنند. کارشناس باید هشدارها را با بازرسی میدانی، اندازه‌گیری و سابقهٔ سازه بررسی کند. در گزارش کانزاس، پهپادها برای گردآوری تصاویر و مدل YOLOv11برای شناسایی آسیب اجزای پل به کار گرفته شدند؛ این نمونه کاربرد واقعی یک زنجیرهٔ داده تا تصمیم‌یار است، نه گواه دقت یکسان در همهٔ پل‌ها USDOT.

۵.۳ مثال ۳ :حسگر و ناهنجاری

اگر حسگرهای پل ناگهان قرائت متفاوتی بدهند، سامانه آن را برای بررسی علامت می‌زند. مهندس ابتدا کیفیت حسگر، زمان ثبت، دما و وضعیت نگهداری را می‌سنجد؛ سپس در صورت لزوم اندازه‌گیری مستقل می‌گیرد. خروجی مدل «نیازمند بررسی» است، نه حکم قطعیِ خرابی.

۵.٤ مثال ٤ :برنامهٔ کارگاهی

برای استخراج دلایل تأخیر از گزارش‌های روزانه، مدل زبان می‌تواند مواردی چون بارندگی، تأخیر تأمین یا توقف تجهیز را دسته‌بندی کند. مدیر پروژه باید نمونه‌ای از دسته‌بندی‌ها را با متن اصلی تطبیق دهد و دادهٔ محرمانهٔ کارفرما یا کارکنان را بدون مجوز وارد ابزار عمومی نکند.

عمران از کدام نوع هوش مصنوعی استفاده می‌کند؟

نوع هوش مصنوعی را **گرایش عمران به‌تنهایی** تعیین نمی‌کند؛ **داده و خروجی مورد انتظار** تعیین می‌کنند. حتی یک پروژهٔ نگهداری پل می‌تواند چند روش را هم‌زمان به کار ببرد.

ورودی	خروجی موردنیاز	روش مناسب برای شروع
عکس عرشه یا ستون	محل مشکوک به ترک	بینایی ماشین
جدول طرح اختلاط	مقاومت فشاری تخمینی	رگرسیون نظارت‌شده
قرائت حسگر در طول زمان	رفتار غیرمعمول	تشخیص ناهنجاری
گزارش روزانهٔ کارگاه	فهرست علت‌های ثبت‌شدهٔ تأخیر	پردازش زبان طبیعی
سوابق پرداخت و پیشرفت	احتمال تأخیر پروژه	طبقه‌بندی یا مدل سری زمانی
جریان ترافیک شبیه‌سازی‌شده	راهبرد تنظیم چراغ	کنترل یا یادگیری تقویتی
یادداشت بازدید	پیش‌نویس گزارش	هوش مولد
معیارهای نگهداری و نظر کارشناسان	اولویت اولیهٔ بازدید	قواعد کارشناسی یا تصمیم‌گیری چندمعیاره

مثال» :بررسی پل» یک موضوع است، نه تعریف مسئله. «علامت‌گذاری نواحی مشکوک به ترک در عکس‌های عرشه برای اولویت‌بندی بازدید» یک مسئلهٔ مشخص و قابل ارزیابی است.

یادگیری نظارت‌شده: رگرسیون و طبقه‌بندی

در یادگیری نظارت‌شده، مدل از نمونه‌هایی یاد می‌گیرد که پاسخ آن‌ها معلوم است. دو مسئلهٔ رایج عبارت‌اند از:

- **رگرسیون:** پاسخ یک عدد است؛ مانند مقاومت بتن بر حسب مگاپاسکال یا مدت تأخیر بر حسب روز.
- **طبقه‌بندی:** پاسخ یک دسته است؛ مانند «دارای خرابی/فاقد خرابی» یا «ریسک کم، متوسط، زیاد».

فرض کن برای دویست طرح اختلاط، مقادیر مصالح و مقاومت ۲۸روزه را داریم. اگر بخواهیم مقاومت نمونهٔ جدید را **۳۱ مگاپاسکال** تخمین بزنیم، مسئله رگرسیون است. اگر بخواهیم برآورد کنیم نمونه احتمالاً **در گروه نیازمند بررسی** قرار می‌گیرد یا نه، مسئله طبقه‌بندی است.

یک مسئله را می‌توان به هر دو شکل تعریف کرد، اما انتخاب باید به نیاز عملی وابسته باشد. عدد پیش‌بینی‌شده برای مقایسهٔ چند گزینه مفید است؛ یک هشدار دسته‌ای ممکن است برای تعیین اولویت آزمایش تکمیلی مناسب‌تر باشد.

یادگیری بدون نظارت و کشف الگو

در یادگیری بدون نظارت، پاسخ آماده‌ای برای هر نمونه نداریم. مدل می‌کوشد ساختار داده را پیدا کند؛ مثلاً قطعات راه را بر اساس شباهت در ترافیک، سن روسازی و الگوی خرابی گروه‌بندی کند. این کار **خوشه‌بندی** نام دارد.

کاربرد دیگر، یافتن موارد غیرعادی است. اگر رفتار حسگر یک پل با الگوی معمول هم‌خوان نباشد، سامانه آن را علامت می‌زند. اما «غیرعادی» به معنای «آسیب‌دیده» نیست. افت ولتاژ، تعویض حسگر، تغییر دما یا عملیات تعمیراتی نیز می‌تواند یک الگوی تازه ایجاد کند.

مثال کلاسی: ده قطعهٔ راه را بر اساس سن روسازی و شمار عبور خودروهای سنگین گروه‌بندی کن. بعد بررسی کن آیا قطعات یک گروه واقعاً نیاز نگهداری مشابهی دارند یا جنس روسازی و زهکشی، که در مدل وارد نشده‌اند، تفاوت بزرگی ایجاد می‌کنند.

خوشه‌بندی، فرضیه‌ای برای بررسی می‌دهد؛ نام و تفسیر فنی گروه‌ها باید با شواهد تعیین شود.

یادگیری عمیق و شبکهٔ عصبی

شبکهٔ عصبی مدلی است که از لایه‌های محاسباتی برای تبدیل ورودی به خروجی استفاده می‌کند. وقتی این ساختار چندلایه و عمیق باشد، اصطلاح **یادگیری عمیق** به کار می‌رود. در تصویر، لایه‌ها می‌توانند الگوهایی مانند لبه، بافت و شکل‌های پیچیده‌تر را یاد بگیرند.

در تشخیص خرابی بتن، یک مدل عمیق ممکن است با نمونه‌های متعدد، تفاوت ظاهری میان ترک، لکه و درز را تا حدودی بیاموزد. اما اگر در دادهٔ آموزشی تقریباً همهٔ عکس‌های ترک در نور زیاد و همهٔ عکس‌های سالم در سایه باشند، مدل ممکن است **نور** را یاد بگیرد، نه **ترک** را. به همین دلیل، تنوع داده و آزمون مستقل مهم است.

در داده‌های جدولی کوچک، مدل ساده مانند رگرسیون یا درخت تصمیم ممکن است گزینهٔ بهتری برای شروع باشد. عمیق‌تر بودن مدل به‌خودی‌خود به معنای دقت بیشتر یا توضیح‌پذیری بهتر نیست.

گروک، جیمینای، ChatGPTو دیگر ابزارها؛ کدام بهتر است؟

هیچ ابزار واحدی برای همهٔ کارها «بهترین» نیست؛ انتخاب را با نوع فایل، نیاز به منبع، زبان، دسترسی، محرمانگی و کیفیت پاسخ بسنجید. قابلیت‌ها، نام مدل‌ها، سقف بارگذاری و دسترسی منطقه‌ای مرتب تغییر می‌کنند؛ پیش از استفادهٔ جدی، وضعیت روز ابزار را بررسی کنید.

ابزار	برای چه کاری امتحان شود؟	نمونه درخواست
ChatGPT	توضیح مفاهیم، ساخت جزوه و کار با فایل‌های پیوست در صورت پشتیبانی حساب	«این گزارش بتن را خلاصه کن؛ داده‌های گزارش را از برداشت خودت جدا کن.»
Gemini	کار با تصویر و اسناد در گردش‌کارهای وابسته به خدمات گوگل، در صورت فعال بودن قابلیت‌ها	«در این تصویر فقط نشانه‌های قابل مشاهده را فهرست کن و موارد نامعلوم را جدا بنویس.»
Grok	گرفتن سرنخ از موضوعات روز یا محتوای Xدر نسخه‌هایی که دسترسی دارند	«چند سرنخ درباره بازرسی پهپادی پل بده؛ ادعاهای شبکه اجتماعی را از اسناد رسمی جدا کن.»
Claude	بازنویسی و سازمان‌دهی متن‌های طولانی، بسته به قابلیت‌های حساب	«یادداشت‌ها را به مشاهدات، پرسش‌های باز و اقدامات پیشنهادی تقسیم کن؛ چیزی اضافه نکن.»
NotebookLM	پرسش‌وپاسخ بر اساس منابعی که خودتان بارگذاری می‌کنید	«فقط بر اساس این فایل‌ها دو روش بازرسی را مقایسه و محل استناد را مشخص کن.»

برای جزوه‌نویسی فارسی، ChatGPTیا Geminiرا با یک کار واقعی آزمایش کنید؛ برای مطالعهٔ چند مقالهٔ خودتان، NotebookLMیا ابزار دارای ارجاع قابل‌ردیابی مناسب‌تر است. Grokمی‌تواند برای یافتن سرنخ مفید باشد، اما پست اجتماعی را مرجع فنی نگیرید. ChatGPTامکان کار با فایل‌های متنی، اسناد، صفحه‌گسترده و تصویر را در شرایط و طرح‌های پشتیبانی‌شده توضیح می‌دهد؛ محدودیت‌ها و دسترسی به حساب و مدل وابسته‌اند راهنمای رسمی OpenAI.

پردازش زبان طبیعی در اسناد عمرانی

پردازش زبان طبیعی به تحلیل و استخراج اطلاعات از متن می‌پردازد. در عمران می‌توان از آن برای دسته‌بندی گزارش‌های روزانه، پیدا کردن علت‌های ثبت‌شدهٔ تأخیر، استخراج شمارهٔ تجهیز یا مرتب‌کردن صورت‌جلسه‌ها استفاده کرد.

به این یادداشت توجه کن: «بتن‌ریزی ناحیهٔ B انجام نشد؛ علت اعلام‌شده، آماده نبودن مسیر دسترسی بود. زمان جدید هنوز تعیین نشده است.»

خروجی ساختاریافته می‌تواند این باشد:

- فعالیت: بتن‌ریزی ناحیهٔ B؛
- وضعیت: انجام نشده؛
- علت ثبت‌شده: آماده نبودن مسیر دسترسی؛
- زمان جدید: نامشخص.

مدل نباید بنویسد «بتن‌ریزی فردا انجام خواهد شد» یا «پیمانکار مسئول تأخیر است»، زیرا این اطلاعات در متن نیامده‌اند. همچنین جملهٔ «خرابی مشاهده نشد» از نظر معنا با «خرابی مشاهده شد» تفاوت اساسی دارد؛ حذف یک کلمه می‌تواند گزارش را وارونه کند.

هوش مصنوعی مولد و محدودیت مدل‌های زبانی

هوش مولد می‌تواند متن، تصویر، کد یا گزینه‌های اولیه تولید کند. در عمران، کاربردهای مناسب آن شامل تهیهٔ پیش‌نویس گزارش، ساخت تمرین درسی، توضیح اصطلاحات یا پیشنهاد ساختار یک چک‌لیست است.

نمونهٔ درخواست ضعیف: «برای این پل گزارش فنی بده.»

نمونهٔ درخواست بهتر: «فقط با اتکا به یادداشت‌های زیر، پیش‌نویس گزارش بازدید را در سه بخش مشاهده، اطلاعات ناموجود و اقدام پیشنهادی تنظیم کن. هیچ اندازه، تاریخ یا نتیجهٔ قطعی اضافه نکن.»

مدل زبانی ممکن است متنی روان و قانع‌کننده تولید کند که از نظر فنی نادرست باشد. برای مثال، ممکن است شمارهٔ بند آیین‌نامه‌ای یا نتیجهٔ آزمایشی را که در منبع نیست، با لحن مطمئن بیان کند. **شیوایی متن نشانهٔ اعتبار آن نیست.** اعداد، ارجاع‌ها و ادعاهای فنی را جداگانه بررسی کن.

سیستم خبره و منطق فازی

سیستم خبره معمولاً از قواعد صریح استفاده می‌کند. مثلاً در یک سامانهٔ نگهداری، قاعده‌ای می‌گوید: «اگر ثبت مشاهده ناقص است، پرونده برای تکمیل مستندات به بازرس برگردد.» این قاعده از داده یاد نمی‌گیرد؛ کارشناسان آن را تعریف می‌کنند.

منطق فازی زمانی مفید است که مرز یک مفهوم کاملاً تیز نباشد. مثلاً یک وضعیت می‌تواند تا حدی عضو دستهٔ «خرابی متوسط» و تا حدی عضو دستهٔ «خرابی زیاد» باشد. درجهٔ عضویت فازی لزوماً احتمال وقوع خرابی نیست؛ نشان می‌دهد یک مقدار تا چه حد با یک توصیف سازگار است.

نمونهٔ کاربردی، ترکیب شدت خرابی، اهمیت مسیر و دشواری دسترسی برای **اولویت‌بندی بازدید** است. قواعد و وزن‌ها باید مستند باشند تا کارشناس بداند تغییر یک معیار چرا رتبه را عوض کرده است. اولویت بیشتر به معنای صدور حکم دربارهٔ ایمنی سازه نیست.

یادگیری تقویتی و تصمیم‌های پشت‌سرهم

در یادگیری تقویتی، یک عامل در محیطی مشخص اقدام می‌کند و بازخوردی به شکل پاداش یا جریمه می‌گیرد. هدف این است که راهبردی یاد بگیرد که در مجموعه‌ای از تصمیم‌ها عملکرد مناسب داشته باشد.

در شبیه‌سازی ترافیک، **وضعیت** می‌تواند طول صف در ورودی‌های تقاطع باشد، **اقدام** تغییر مدت چراغ سبز و **پاداش** کاهش مجموع زمان انتظار. اما اگر فقط انتظار خودرو را در پاداش لحاظ کنیم، عامل ممکن است زمان انتظار عابر پیاده را زیاد کند. بنابراین محدودیت‌های ایمنی و معیارهای عدالت باید از ابتدا مشخص باشند.

اصل اجرایی: سامانهٔ کنترل را اول با یک روش ساده، مانند برنامهٔ زمان‌بندی ثابت، مقایسه کن. عملکرد بهتر در شبیه‌ساز مجوز آزمون بدون کنترل در تقاطع واقعی نیست. نتیجه باید در سناریوهای مختلف، از جمله خرابی حسگر یا افزایش ناگهانی تقاضا، بررسی شود.

بهینه‌سازی، طراحی مولد و قیدهای مهندسی

بهینه‌سازی یعنی جست‌وجوی گزینه‌ای که هدفی مانند کاهش هزینه، زمان یا مصرف مصالح را بهتر برآورده کند، بدون آنکه قیدها نقض شوند. هر روش بهینه‌سازی هوش مصنوعی نیست. برای مثال، یک برنامهٔ ریاضی می‌تواند زمان‌بندی تجهیزهای کارگاهی را بدون یادگیری ماشین بهینه کند.

در طراحی مولد، سامانه می‌تواند چند چیدمان یا گزینهٔ اولیه پیشنهاد دهد. **هدف** ممکن است کاهش هزینه باشد؛ **قید** می‌تواند حداقل فضای دسترسی، محدودیت نیروی انسانی یا الزام فنی باشد. اگر یک قید مهم را وارد نکنیم، جواب به‌ظاهر بهینه در عمل نامناسب خواهد بود.

برای مثال، یک برنامهٔ زمان‌بندی ممکن است کار چند گروه را هم‌زمان کند تا مدت پروژه کم شود، اما فضای واقعی کارگاه اجازهٔ حضور هم‌زمان آن‌ها را ندهد. راه‌حل خوب فقط کمترین عدد نیست؛ باید **قابل اجرا و قابل بررسی** باشد.

عدم‌قطعیت، حریم خصوصی و مسئولیت مهندس

پیش‌بینی مقاومت بتن به شکل «حدود ۳۲ مگاپاسکال» با نتیجهٔ آزمایش یکی نیست. اگر مدل بازه‌ای برای پیش‌بینی ارائه می‌کند، اعتبار آن بازه باید روی داده‌های مستقل بررسی شده باشد. گذاشتن یک بازهٔ دلخواه کنار عدد، عدم‌قطعیت را به‌درستی گزارش نمی‌کند.

سه قاعدهٔ کاربردی:

- **دادهٔ حساس را بی‌محابا بارگذاری نکن:** عکس کارکنان، اطلاعات مکانی حساس، اسناد قراردادی و جزئیات پروژه ممکن است مشمول محدودیت باشند. از دادهٔ آموزشی یا نسخهٔ پاک‌سازی‌شده استفاده کن.
- **مسیر تصمیم را ثبت کن:** دادهٔ استفاده‌شده، تاریخ، نسخهٔ مدل، خروجی و بازبینی انسانی مشخص باشد.
- **شرایط ارجاع داشته باش:** وقتی عکس نامناسب، داده ناقص یا شرایط خارج از محدودهٔ آموزش است، مدل باید بتواند نتیجه ندهد و مورد را ارجاع دهد.

در تصمیم‌های مؤثر بر ایمنی، خروجی هوش مصنوعی جایگزین بازرسی، محاسبه و مسئولیت حرفه‌ای نیست.

سازه: تحلیل، طراحی و تفکیک نقش مدل‌ها

در مهندسی سازه، مدل‌های داده‌محور می‌توانند تخمین اولیهٔ برخی پاسخ‌ها، مانند جابه‌جایی یک سازهٔ مشخص، را انجام دهند. مثلاً یک مدل از نتایج تعداد زیادی تحلیل سازه‌ای یاد می‌گیرد تا برای طرح‌های مشابه، پاسخ تقریبی بدهد. چنین مدلی را **مدل جانشین** می‌نامند.

کاربرد مناسب آن غربال سریع گزینه‌هاست: از میان صدها حالت، ابتدا تعدادی گزینهٔ امیدوارکننده انتخاب می‌شوند و سپس تحلیل کامل و کنترل فنی روی آن‌ها انجام می‌شود. اگر هندسه، سیستم باربر یا مصالح از محدودهٔ آموزش خارج شوند، اعتبار مدل جانشین معلوم نیست.

سه خروجی متفاوت:

تحلیل سازه پاسخ بر پایهٔ مدل فیزیکی می‌دهد؛ یادگیری ماشین الگوی آموخته‌شده از داده را به‌کار می‌برد؛ دستیار مولد می‌تواند گزارش محاسبات را تنظیم کند. این سه نقش نباید جای هم بنشینند.

بازرسی تصویری پل: از عکس تا بازدید هدفمند

فرایند پیشنهادی برای نمونهٔ آموزشی:

۱. از هر عضو با شناسه و تاریخ مشخص عکس بردار.

۲. عکس‌های تار، بدون دید کافی یا بدون امکان شناسایی محل را جدا کن.

۳. از بازرس بخواه نمونه‌ها را به ترک، درز، لکه یا «نامشخص» برچسب بزنند.

۴. مدل را برای علامت‌گذاری نواحی مشکوک آموزش بده یا یک مدل موجود را با دادهٔ محلی ارزیابی کن.

۵. نتیجه را برای بررسی انسانی همراه با عکس اصلی و شناسهٔ عضو ارائه کن.

نمونهٔ گزارش مناسب: «در تصویر عضو R۳P-۲ خطی مورب مشاهده می‌شود که نیازمند بررسی میدانی است. به دلیل نبود مقیاس، عرض آن تعیین نشده است.»

نمونهٔ گزارش نامناسب: «ترک برشی با عرض ۲ میلی‌متر وجود دارد و پل ناایمن است.» اگر عکس و دادهٔ کافی نداریم، نه نوع ترک، نه عرض آن و نه وضعیت ایمنی از چنین خروجی‌ای قابل استنتاج نیست

پایش سلامت سازه با حسگر

حسگرهای سازه می‌توانند شتاب، کرنش، دما یا جابه‌جایی را در زمان ثبت کنند. هوش مصنوعی در این حوزه معمولاً برای تشخیص تغییر روند یا رفتار غیرمعمول به کار می‌رود.

فرض کن شاخصی از ارتعاش پل در روزهای سرد با روزهای گرم متفاوت است. اگر مدل اثر دما را در نظر نگیرد، هر موج سرما می‌تواند هشدار ایجاد کند. روش مناسب این است که رفتار معمول را در شرایط بهره‌برداری و محیطی مختلف ثبت کنیم و سپس انحراف از رفتار مورد انتظار را بررسی کنیم.

جدول ثبت هشدار بهتر است زمان، شناسهٔ حسگر، مقدار مشاهده‌شده، شرایط محیطی و توضیح بررسی را داشته باشد. یک هشدار منفرد ممکن است از نویز باشد. تکرار هشدار، هم‌زمانی با حسگرهای دیگر و مطابقت با بازدید به تعیین اولویت کمک می‌کند. مدل می‌گوید «بررسی کن»، نه «آسیب قطعی است».

نگهداری پل و اولویت‌بندی منابع

شهرداری یا سازمان بهره‌بردار معمولاً ظرفیت بازدید و تعمیر همهٔ پل‌ها را به‌طور هم‌زمان ندارد. سامانهٔ تصمیم‌یار می‌تواند اطلاعاتی مانند سابقهٔ خرابی، اهمیت مسیر، حجم تردد و زمان آخرین بازدید را برای تهیهٔ صف پیشنهادی ترکیب کند.

فرض کن دو پل وضعیت ظاهری مشابه دارند، اما یکی تنها مسیر دسترسی یک منطقه است و دیگری مسیر جایگزین دارد. اهمیت بهره‌برداری می‌تواند باعث شود اولی **اولویت بازدید** بیشتری بگیرد. این اولویت به معنای وضعیت سازه‌ای بدتر نیست.

برای جلوگیری از برداشت اشتباه، در گزارش دو ستون جدا بگذار: **شواهد وضعیت فنی** و **اهمیت بهره‌برداری**. کنار هر رتبه نیز توضیح بده چه عواملی آن را تعیین کرده‌اند. اگر بازرس نتیجه را تغییر داد، علت تغییر ثبت شود تا فرایند در آینده قابل بازبینی بماند.

بتن: تخمین مقاومت فشاری

مقاومت بتن تحت تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی، نوع مصالح، شرایط عمل‌آوری، سن آزمایش و عوامل دیگر است. وقتی مجموعه‌ای از طرح‌های اختلاط همراه با نتایج آزمایش در اختیار داریم، می‌توانیم مسئله را به‌صورت رگرسیون تعریف کنیم.

ورودی نمونه: مقدار آب، سیمان، سنگ‌دانه، افزودنی و سن نمونه.

خروجی: مقاومت فشاری آزمایشگاهی، بر حسب مگاپاسکال.

خط مبنا: میانگین مقاومت دادهٔ آموزش یا یک مدل خطی ساده.

معیار: میانگین قدرمطلق خطا، در کنار بررسی جداگانهٔ خطاهای بیش‌برآورد.

چرا بیش‌برآورد مهم است؟ اگر مدل مقاومت واقعی ۲۷ را ۳۴ پیش‌بینی کند، ممکن است خوش‌بینی ایجاد کند. بنابراین فقط میانگین خطا را نبین؛ بررسی کن مدل با نمونه‌های کم‌مقاومت چگونه رفتار می‌کند. مدل به‌خصوص برای مصالح جدید یا عمل‌آوری متفاوت نیازمند ارزیابی مجدد است و جایگزین آزمون پذیرش نیست.

مصالح، دوام و انتخاب طرح اختلاط

هوش مصنوعی فقط برای مقاومت نیست. می‌توان از داده‌ها برای تخمین کارایی، بررسی شاخص‌های دوام یا پیشنهاد گزینه‌های طرح اختلاط استفاده کرد. اما هر هدف داده و سنجهٔ خودش را می‌خواهد. مدلی که مقاومت ۲۸روزه را پیش‌بینی می‌کند، لزوماً عملکرد دوام در محیط بهره‌برداری را پیش‌بینی نمی‌کند.

در یک تمرین، فرض کن طرح A هزینهٔ کمتری دارد و طرح B شاخص دوام بهتری نشان می‌دهد. اگر مالکیت سازه بلندمدت باشد، هزینهٔ اولیه نباید تنها معیار باشد. مدل می‌تواند چند گزینه را برای آزمایش پیشنهاد دهد، به شرط آنکه معیارهایی مثل دسترسی به مصالح، مشخصات فنی و شرایط محیطی از قلم نیفتند.

پرسش کنترلی: آیا هدف کاهش هزینهٔ اولیه است، کاهش هزینهٔ چرخهٔ عمر، یا دستیابی به تعادلی میان هزینه، کارایی و دوام؟ پاسخ این سؤال قبل از مدل‌سازی لازم است.

ژئوتکنیک: تخمین ویژگی‌های خاک و نشست

داده‌های ژئوتکنیکی از گمانه‌ها، آزمایش‌های صحرایی، آزمایشگاه و سوابق اجرایی می‌آیند. یادگیری ماشین می‌تواند برای تخمین اولیهٔ برخی ویژگی‌ها یا کمک به مقایسهٔ سناریوهای نشست استفاده شود. اما **تغییرپذیری مکانی خاک** محدودیت مهمی است: دو محل نزدیک ممکن است لایه‌بندی یا سطح آب زیرزمینی متفاوتی داشته باشند.

اگر مدل را روی چند گمانهٔ یک منطقه آموزش بدهیم، نباید عملکرد آن را در منطقه‌ای با زمین‌شناسی متفاوت فرض کنیم. برای آزمون واقعی‌تر، داده را بر اساس محل یا پروژه جدا کن، نه صرفاً با قرعه‌کشی ردیف‌ها.

خروجی مناسب: «برآورد اولیه بر اساس داده‌های موجود؛ لایهٔ زیرین با عدم‌قطعیت بالا.»

اقدام مناسب: مقایسه با تحلیل مکانیک خاک و بررسی اینکه دادهٔ تکمیلی برای کدام عمق یا محل ارزش بیشتری دارد.

گودبرداری، ابزار دقیق و بررسی روند

در پایش تغییرشکل پیرامون گود، اهمیت با روند، کیفیت اندازه‌گیری و وضعیت ساخت است؛ نه فقط یک عدد. تغییر مرحلهٔ خاک‌برداری، نصب مهاربند یا خرابی ابزار می‌تواند الگوی داده را تغییر دهد.

یک سامانهٔ تحلیل داده می‌تواند جابه‌جایی‌ها را در طول زمان مرتب کند، قرائت‌های مشکوک را علامت بزند و کنار نمودار، فعالیت‌های اجرایی همان روز را نمایش دهد. اگر سامانه افزایش نرخ جابه‌جایی را تشخیص داد، لازم است زمان قرائت، سلامت ابزار و رویدادهای کارگاه بررسی شوند.

محدودیت اساسی: حدود هشدار، اقدام و توقف باید از طرح پایش، اسناد پروژه و نظر متخصص مسئول گرفته شوند. یک مدل زبانی نباید از روی چند مثال آموزشی برای یک گود واقعی عدد حد مجاز تعیین کند. هنگام ناقص بودن داده، «وضعیت نامعلوم» از اعلام اطمینان بی‌پشتوانه بهتر است.

راه و روسازی: تشخیص و نقشه‌برداری خرابی

تصاویر سطح راه می‌توانند برای شناسایی چاله، ترک یا وصله بررسی شوند. پیوند تصویر با موقعیت، جهت حرکت و تاریخ، امکان تهیهٔ نقشهٔ خرابی را فراهم می‌کند. سپس کارشناس می‌تواند تغییرات را در بازدیدهای مختلف مقایسه کند.

اگر مدل روی عکس‌های روز آفتابی آموزش دیده باشد، بازتاب آب یا خط‌کشی در تصاویر شبانه ممکن است آن را گمراه کند. لازم است بخشی از آزمون شامل نور، فصل و شرایط متفاوت باشد. همچنین در برداشت ویدئویی ممکن است یک چاله در چند فریم دیده شود؛ بدون حذف تکرار، شمار خرابی‌ها بیش از واقع گزارش می‌شود.

مثال: ابتدا مدل موارد مشکوک را پیدا می‌کند؛ بعد داده‌های هم‌مکان بررسی و ادغام می‌شوند؛ در نهایت کارشناس نوع و اولویت رسیدگی را با توجه به بازدید و شرایط مسیر تعیین می‌کند.

اولویت نگهداری روسازی و بودجه

هدف مدیریت روسازی فقط پیدا کردن بدترین قطعه نیست؛ باید با بودجهٔ محدود، ترکیب مناسبی از مداخلات انتخاب شود. ممکن است تعمیر پیشگیرانهٔ یک قطعهٔ نسبتاً سالم از خرابی پرهزینه در آینده جلوگیری کند، درحالی‌که قطعهٔ دیگری به اصلاح عمیق نیاز دارد.

برای هر قطعه اطلاعاتی مانند نوع خرابی، وسعت، شدت، ترافیک، هزینهٔ مداخله و زمان آخرین تعمیر جمع‌آوری کن. سپس می‌توان **وضعیت فعلی** را با یک مدل طبقه‌بندی بررسی کرد، **روند آینده** را با دادهٔ تاریخی تخمین زد و **سبد پروژه‌ها** را با روش بهینه‌سازی انتخاب کرد.

تمرین مفهومی: اگر وزن ترافیک را دو برابر کنیم، رتبهٔ کدام قطعات عوض می‌شود؟ این تحلیل حساسیت نشان می‌دهد اولویت‌بندی چقدر به انتخاب‌های مدیریتی وابسته است و مانع آن می‌شود که یک رتبه را حقیقت قطعی بدانیم.

حمل‌ونقل: پیش‌بینی حجم ترافیک

برای پیش‌بینی ترافیک باید افق زمانی روشن باشد: پانزده دقیقهٔ بعد، فردا یا فصل آینده؟ هر افق، داده و کاربرد متفاوتی دارد. ورودی می‌تواند شامل شمار خودرو، ساعت، روز هفته، تعطیلی، بارش یا رخداد ثبت‌شده باشد.

خط مبنای خوب برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت می‌تواند **مقدار دورهٔ قبل** یا **مقدار همان ساعت در هفتهٔ قبل** باشد. مدل پیچیده باید در آزمون زمانی از چنین مبنایی بهتر عمل کند. علاوه بر میانگین خطا، خطا در ساعت اوج را جداگانه بررسی کن؛ کم‌برآوردی پیک ممکن است پیامد مهم‌تری از خطای مشابه در ساعات کم‌تردد داشته باشد.

توجه: پیش‌بینی حجم ترافیک با کنترل ترافیک یکی نیست. پیش‌بینی می‌گوید چه وضعیتی محتمل است؛ کنترل تعیین می‌کند با چراغ، پیام‌رسانی یا مدیریت مسیر چه اقدامی انجام شود.

چراغ تطبیقی و مدیریت تقاطع

چراغ زمان‌ثابت بر اساس یک برنامهٔ از پیش تعیین‌شده کار می‌کند. کنترل تطبیقی می‌کوشد زمان‌بندی را با توجه به شرایط تغییر دهد. برخی روش‌های تطبیقی قاعده‌محورند؛ برخی از بهینه‌سازی یا یادگیری تقویتی استفاده می‌کنند.

برای مقایسهٔ دو برنامه، فقط میانگین تأخیر خودرو کافی نیست. **زمان انتظار عابر پیاده، طول صف، حداکثر تأخیر یک جهت و تأثیر بر تقاطع‌های مجاور** هم مهم‌اند. اگر زمان سبز یک جهت بیشتر شود، احتمال دارد صف به خیابان دیگری منتقل شود.

تمرین: برای یک تقاطع شبیه‌سازی‌شده، سه سناریو تعریف کن: ترافیک عادی، افزایش تقاضای یک جهت و قطع یک حسگر. هر روش را در سه سناریو با همان معیارها بسنج. راهبرد مناسب باید در شرایط اختلال نیز رفتار قابل پیش‌بینی و گزینهٔ بازگشت به کنترل جایگزین داشته باشد.

شبکهٔ آب: مصرف، فشار و ناهنجاری

قرائت کنتورها و حسگرهای فشار به تشخیص الگوهای مصرف کمک می‌کند. اگر جریان شبانه در بخشی از شبکه نسبت به الگوی معمول بالا بماند، سامانه می‌تواند آن ناحیه را برای بررسی علامت بزند. ولی افزایش جریان به‌تنهایی اثبات نشتی نیست؛ تغییر الگوی مصرف، عملیات بهره‌برداری یا خطای قرائت نیز ممکن است علت باشد.

فرایند پیشنهادی: دادهٔ ناقص را مشخص کن، با دوره‌های مشابه مقایسه کن، ناحیهٔ مشکوک را ثبت کن و نتیجه را با اطلاعات فشار، سوابق تعمیرات و بررسی میدانی بسنج.

برای مصرف ساختمان‌ها نیز رعایت حریم خصوصی مهم است. الگوهای زمانی ممکن است اطلاعاتی دربارهٔ فعالیت ساکنان آشکار کنند. برای تحلیل مدیریتی، در جایی که کافی است از دادهٔ تجمیعی و شناسه‌های غیرشخصی استفاده کن.

مدیریت ساخت: پیش‌بینی تأخیر و هزینه

برای پیش‌بینی تأخیر، باید تاریخ **زمان پیش‌بینی** معلوم باشد. اگر هدف این است که در پایان هفتهٔ چهارم دربارهٔ تأخیر احتمالی هشدار بدهیم، فقط اطلاعاتی را وارد مدل می‌کنیم که تا همان هفته ثبت شده‌اند؛ مثل درصد پیشرفت، روزهای توقف، وضعیت تأمین مصالح و سوابق پرداخت در دسترس.

دو سؤال متفاوت وجود دارد: «آیا پروژه به تأخیر می‌افتد؟» مسئلهٔ طبقه‌بندی است؛ «چند روز تأخیر خواهد داشت؟» مسئلهٔ رگرسیون است. برای اقدام مدیریتی، بهتر است هشدار همراه با توضیح محدودیت‌ها و داده‌های مؤثر ارائه شود.

هشدار: همبستگی دلیل قطعی نیست. اگر مدل کمبود مصالح را مرتبط با تأخیر نشان دهد، باید بررسی کرد آیا این عامل علت اصلی، نشانهٔ مشکل دیگر یا صرفاً مربوط به چند پروژهٔ خاص بوده است.

مدیریت ساخت: پیش‌بینی تأخیر و هزینه

برای پیش‌بینی تأخیر، باید تاریخ **زمان پیش‌بینی** معلوم باشد. اگر هدف این است که در پایان هفتهٔ چهارم دربارهٔ تأخیر احتمالی هشدار بدهیم، فقط اطلاعاتی را وارد مدل می‌کنیم که تا همان هفته ثبت شده‌اند؛ مثل درصد پیشرفت، روزهای توقف، وضعیت تأمین مصالح و سوابق پرداخت در دسترس.

دو سؤال متفاوت وجود دارد: «آیا پروژه به تأخیر می‌افتد؟» مسئلهٔ طبقه‌بندی است؛ «چند روز تأخیر خواهد داشت؟» مسئلهٔ رگرسیون است. برای اقدام مدیریتی، بهتر است هشدار همراه با توضیح محدودیت‌ها و داده‌های مؤثر ارائه شود.

هشدار: همبستگی دلیل قطعی نیست. اگر مدل کمبود مصالح را مرتبط با تأخیر نشان دهد، باید بررسی کرد آیا این عامل علت اصلی، نشانهٔ مشکل دیگر یا صرفاً مربوط به چند پروژهٔ خاص بوده است.

کنترل کیفیت و پیشرفت کارگاه

تصاویر دوره‌ای کارگاه را می‌توان با نقشه، برنامهٔ زمانی یا سوابق اجرا مقایسه کرد. سامانه ممکن است حضور اجزای قابل مشاهده یا تغییرات ظاهری را ثبت کند، اما کیفیت کارهای پنهان‌شده، تطابق جزئیات اجرایی یا تأیید صورت‌وضعیت فقط از عکس عمومی قابل تعیین نیست.

مثال: عکس نشان می‌دهد بخشی از قالب‌بندی اجرا شده است. این مشاهده با «آرماتوربندی مطابق نقشه تأیید شد» فرق دارد. تأیید کیفیت نیازمند مستندات، کنترل مستقیم و روال مشخص پروژه است.

در تهیهٔ گزارش روزانه، هوش مولد می‌تواند جملات کوتاه را به گزارشی مرتب تبدیل کند. شرط مهم آن است که مشاهدات، ادعاهای افراد و نتیجه‌گیری بازرس از هم جدا بمانند. مثلاً «طبق اعلام سرپرست کارگاه» نباید در بازنویسی تبدیل شود به «بازرس تأیید کرد».

BIM، GIS و دوقلوی دیجیتال

BIM مدل اطلاعاتی ساختمان یا زیرساخت است که می‌تواند هندسه، مشخصات و داده‌های مرتبط با اجزا را یکجا نگه دارد. **GIS** برای ذخیره و تحلیل اطلاعات مکانی مناسب است؛ مانند موقعیت پل‌ها، راه‌ها، شبکهٔ آب یا خرابی‌های ثبت‌شده. هیچ‌کدام به‌خودی‌خود هوش مصنوعی نیستند.

دوقلوی دیجیتال بازنمایی دیجیتال یک دارایی یا فرایند است که با داده‌های دارایی واقعی به‌روزرسانی می‌شود. در یک نمونهٔ پل، مدل هندسی، دادهٔ حسگر، نتایج بازرسی و سابقهٔ تعمیر می‌توانند در کنار هم قرار گیرند. هوش مصنوعی می‌تواند لایهٔ تحلیل را اضافه کند؛ مثلاً تغییرات غیرمعمول را علامت بزند.

کاربرد عملی: مشاهدهٔ خرابی را با شناسهٔ عضو ثبت کن تا در بازدید بعدی بتوان همان محل را پیدا و مقایسه کرد. پیش از ساخت سامانهٔ پیچیده، همین اتصال درست میان عکس، موقعیت، زمان و عضو معمولاً ارزش زیادی دارد.

گرایش	مسئلهٔ نمونه	داده	روش
سازه و پل	تشخیص تغییر غیرمعمول	حسگر و شرایط محیطی	تشخیص ناهنجاری

۱. دستیارهای گفت‌وگویی شبیهChatGPT

نام ابزار	سازنده	برای چه کاری استفاده می‌شود؟
ChatGPTچت‌جی‌پی‌تی	OpenAI	توضیح مفاهیم، جزوه‌نویسی، تولید تمرین، تحلیل داده و کمک به برنامه‌نویسی
Geminiجیمینای	Google	پرسش‌وپاسخ، کار با متن و تصویر و استفاده در گردش کار ابزارهای گوگل
Grokگروک	xAI	گفت‌وگو، تولید محتوا و در نسخه‌های دارای دسترسی، بررسی بحث‌های شبکهٔ اجتماعیX
Claudeکلود	Anthropic	خلاصه‌سازی و بازنویسی متن‌های طولانی، تحلیل اسناد و برنامه‌نویسی
Microsoft Copilotکوپایلوت	Microsoft	دستیار عمومی و، در نسخه‌های مربوط، کمک به کار باWord ، ExcelوPowerPoint
DeepSeekدیپ‌سیک	DeepSeek	پاسخ به پرسش‌ها، حل مسائل ریاضی و کمک به تولید و توضیح کد
Meta AIمتا ای‌آی	Meta	گفت‌وگو، پاسخ‌گویی و تولید محتوا؛ در بعضی محصولات متا نیز در دسترس است
Le Chatلو شَت	Mistral AI	نوشتن، خلاصه‌سازی، پرسش‌وپاسخ و کمک به کار با اسناد
Qwen Chatچت کوئن	Alibaba Cloud	دستیار چندزبانه برای نوشتن، استدلال و برنامه‌نویسی
Kimiکیمی	Moonshot AI	مطالعهٔ اسناد، خلاصه‌سازی و گفت‌وگو دربارهٔ متن‌های طولانی

۲. ابزارهای جست‌وجو، مقاله وPDF

ابزار	**کاربرد**
Perplexity	جست‌وجو در وب و ارائهٔ پاسخ همراه با پیوند منابع
NotebookLM	پرسش‌وپاسخ و تهیهٔ راهنمای مطالعه بر اساس PDFها و منابعی که خودت وارد می‌کنی
Elicit	پیدا کردن مقالات مرتبط و استخراج و مقایسهٔ اطلاعات پژوهش‌ها
Consensus	جست‌وجوی پاسخ در پژوهش‌های علمی

Scite	بررسی اینکه مقاله‌های دیگر چگونه به یک پژوهش استناد کرده‌اند؛ مثلاً آیا یافته آن را تأیید یا نقد کرده‌اند
SciSpace	کمک به خواندن مقاله و توضیح بخش‌های دشوار آن
Semantic Scholar	موتور جست‌وجوی علمی برای یافتن مقاله‌ها و بررسی ارتباط میان پژوهش‌ها

۳ .ابزارهای ساخت تصویر، اسلاید، ویدئو و صدا

حوزه	نمونه ابزارها	کاربرد
تصویرسازی	Midjourney، Adobe Firefly، Stable Diffusion، FLUX	ساخت تصویرمفهومی، تصویرسازی آموزشی و ایده‌پردازی بصری
پوستر و ارائه	Canva Magic Studio، Gamma	آماده‌کردن پیش‌نویس پوستر، اسلاید و ارائه کلاسی
تولید ویدئو	Sora، Veo، Runway، Kling، Pika	ساخت کلیپ از متن یا تصویر؛ برای نمونه، ویدئوی مفهومی یک پروژه عمرانی
ویدئوباگوینده مجازی	HeyGen، Synthesia	ساخت ویدئوی آموزشی با آواتار یا گوینده دیجیتال
تبدیل متن به گفتار	ElevenLabs	آماده‌کردن گویندگی برای درس یا ویدئو
تبدیل گفتار به متن	Whisper	پیاده‌سازی جلسه، کلاس یا مصاحبه
تولید موسیقی	Suno، Udio	ساخت قطعه موسیقی از توضیح متنی

۴ .ابزارهای برنامه‌نویسی، تحلیل و کار اداری

ابزار	کاربرد
GitHub Copilot	پیشنهاد و توضیح کد در محیط برنامه‌نویسی
Cursor	محیط کدنویسی مجهز به دستیار هوش مصنوعی برای کار روی فایل‌های پروژه
Claude Code	کمک به خواندن، تغییر و بررسی کد پروژه
OpenAI Codex	کمک به انجام وظایف برنامه‌نویسی، از نوشتن کد تا بررسی تغییرات
Replit Agent	ساخت نمونه اولیه برنامه یا وب‌اپ از توضیح متنی
Notion AI	تنظیم یادداشت، خلاصه‌سازی و سامان‌دهی اطلاعات کاری
DeepL	ترجمه ماشینی و بازنویسی در زبان‌های پشتیبانی‌شده
Grammarly	اصلاح نگارش و بازنویسی متن، به‌ویژه انگلیسی

۵ .ابزارهای تخصصی‌تر برای عمران و ساخت‌وساز

ابزار	کاربرد
Autodesk Forma	بررسی گزینه‌های اولیهٔ طراحی سایت و تحلیل عواملی مانند نور، باد یا صدا در مرحلهٔ مفهومی
TestFit	تولید و مقایسهٔ چیدمان‌های اولیه برای زمین و پروژهٔ ساختمانی با توجه به قیود
ALICE Technologies	آزمودن سناریوهای زمان‌بندی و تخصیص منابع در ساخت
Buildots	کمک به پایش پیشرفت اجرا با مقایسهٔ تصاویر کارگاه و اطلاعات پروژه
OpenSpace	ثبت تصویری کارگاه و کمک به مستندسازی و پایش پیشرفت
Roboflow، Ultralytics YOLO و Detectron۲	ابزارها و چارچوب‌هایی برای ساخت سامانهٔ بینایی ماشین؛ مثلاً تشخیص چاله یا علامت‌گذاری محل مشکوک به ترک در عکس