

مهندسی عمران در عصر هوش مصنوعی

(جلد اول: کلیات تا کاربردهای هوش مصنوعی)

دکتر احد باقرزاده خلخالی

عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

محمد رضا مرادی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی

محمد اسمعیلی

دانش آموخته کارشناسی مهندسی عمران



انتشارات دانشگاهی فرهنگ

نام کتاب : مهندسی عمران در عصر هوش مصنوعی (جلد اول : کلیات تا کاربردهای هوش مصنوعی)

دکتر احد باقرزاده خلخالی / محمدرضا مرادی / محمد اسمعیلی

تاریخ و نوبت چاپ : اول ۱۴۰۵

شمارگان : ۱۰۰ نسخه

بها : ۴۵۰۰۰۰۰ ریال

شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۴۹۸۰-۷۹-۳

حق چاپ برای نشر دانشگاهی فرهنگ محفوظ می باشد

نشانی : تهران، خیابان انقلاب، روبروی دانشگاه تهران، پاساژ فروزنده ، طبقه اول ، پلاک ۴۱۹

تلفن : ۶۶۴۱۰۶۸۸ - ۶۶۹۶۸۶۱۴

WWW.FARBOOK.IR

Farbook.pub@gmail.com

سرشناسه	: باقرزاده خلخالی، احد، ۱۳۵۶ -
عنوان و نام پدیدآور	: مهندسی عمران در عصر هوش مصنوعی/احد باقرزاده خلخالی، محمدرضا مرادی، محمد اسمعیلی.
مشخصات نشر	: تهران: نشر دانشگاهی فرهنگ، ۱۴۰۵-
مشخصات ظاهری	: ج. ۱: مصور، نمودار.
شابک	: ۲۵۰۰۰۰۰ ریال: ج. ۳-۷۹-۴۹۸۰-۶۲۲-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: کتابنامه.
مندرجات	: ج. ۱. کلیات تا کاربردهای هوش مصنوعی
موضوع	: هوش مصنوعی -- کاربردهای مهندسی عمران Artificial intelligence -- Civil engineering applications مهندسی عمران -- نوآوری Civil engineering -- Technological innovations
شناسه افزوده	: مرادی، محمدرضا، ۱۳۸۰-
شناسه افزوده	: اسمعیلی، محمد، ۱۳۸۲-
رده بندی کنگره	: TA۶۵۶/۶
رده بندی دیویی	: ۶۲۴/۱۷۰۲۸۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۱۰۴۶۱۶۰۶
اطلاعات رکورد کتابشناسی	: فیبا

مقدمه مولفین

با توجه به گسترش روزافزون دانش و فناوری های مرتبط با "هوش مصنوعی"؛ هیچ حوزه فنی و علمی از این گسترش بی بهره نمانده است. رشته مهندسی عمران و گرایش های مرتبط با آن نیز در بسیاری از زمینه های استخراج داده های طراحی، پیش طراحی، طراحی کلیات و جزئیات، بهینه سازی، مهندسی ارزش، مقایسه های ساختاری و موردی و همچنین روش های ساخت - بهره برداری - نگهداری - پایش و مونیتورینگ - علاج بخشی و بهسازی می توانند از کاربردهای هوش مصنوعی بهره مند شوند. این کاربردها، علاوه بر کاهش هزینه ها و زمان بندی در همه مراحل ذکرشده؛ اعتباردهی و اطمینان بخشی مضاعف را نیز به موازات مراحل و فرایندهای متداول در مهندسی عمران به همراه دارد.

در کتاب حاضر، که به لطف خداوند منان تحت عنوان جلد اول از مجموعه کتاب های مرتبط با هوش مصنوعی توسط نویسندگان به نشر گذاشته شده است، آشنائی مقدماتی با هوش مصنوعی تشریح می شود و در ادامه در چارچوب بخش اول؛ مبانی هوش مصنوعی مشتمل بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق و همچنین داده پردازی و ارزیابی های مربوطه در مهندسی عمران بیان می گردند. بر پایه این بخش؛ آمادگی مخاطبین گرامی جهت کاربردهای هوش مصنوعی در شاخه های اصلی مهندسی عمران میسر می شود و این کاربردها در بخش دوم کتاب به صورت طبقه بندی شده ارائه گردیده اند. طبیعتاً با استعانت از خداوند حکیم؛ در فرصت های آتی بخش های تکمیلی کتاب در زمینه های بهره گیری پیشرفته از هوش مصنوعی در پروژه های مهندسی عمران در چارچوب جلد های آتی تقدیم علاقه مندان، پژوهشگران، محققین دانشگاهی و صنعتی، اساتید ارجمند و دانشجویان و مهندسین شاغل در رشته مهندسی عمران خواهد گردید.

ویژگی برجسته این کتاب، ضمن پیشرو بودن در خصوص نشر کاربردهای هوش مصنوعی برای رشته مهندسی عمران به زبان فارسی، تاکید به پیوند نظریات علمی این روش نوین با کاربردهای عملی است. در تدوین و تنظیم کتاب سعی گردیده از یافته ها و انتشارات بین المللی نوین و پیشرو بهره گرفته شود. البته مزید امتنان خواهد بود نویسندگان از نظریات ارزشمند مخاطبین فرهیخته و خوانندگان گرامی کتاب جهت ارتقای مجلدهای آتی بهره مند گردند. با آرزوی توفیق و موفقیت روز افزون برای همه خوانندگان گرامی؛

احد باقرزاده خلخالی

محمد رضا مرادی

محمد اسمعیلی

مقدمه.....	۱۳
فصل ۱.....	۱۸
زمینه‌های پیدایش، تکامل، چالش‌ها و آینده هوش مصنوعی.....	۱۸
تاریخچه و تکامل هوش مصنوعی.....	۱۸
کاربردهای صنعتی و تجاری هوش مصنوعی در مهندسی عمران.....	۲۴
چالش‌ها و محدودیت‌های هوش مصنوعی در مهندسی عمران.....	۲۶
آینده و روندهای نوظهور هوش مصنوعی در مهندسی عمران.....	۲۸
انگیزه و دامنه.....	۳۰
فصل ۲.....	۳۲
مبانی یادگیری و کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه‌های مهندسی عمران.....	۳۲
تکنیک‌های یادگیری هوش مصنوعی و دسته‌بندی آنها در مهندسی عمران.....	۳۲
یادگیری ماشین کلاسیک در مهندسی عمران.....	۳۳
یادگیری عمیق در مهندسی عمران.....	۳۴
مدلهای هوش مصنوعی هیبریدی در مهندسی عمران.....	۳۶
الگوریتم‌های فرا ابتکاری در مهندسی عمران.....	۳۷
یادگیری نظارت‌شده و بدون نظارت.....	۳۹
کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه‌های مهندسی عمران.....	۴۱
رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی در تحلیل و طراحی سازه‌ای.....	۴۳
هوش مصنوعی در تکنولوژی بتن.....	۴۵
هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری در مهندسی ژئوتکنیک.....	۴۷
هوش مصنوعی در مهندسی هیدرولیک و منابع آب.....	۴۹

۵۱.....	یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی در مهندسی حمل‌ونقل و روسازی
۵۳.....	بهره‌گیری از هوش مصنوعی برای مدیریت ساخت‌وساز
۵۵.....	بهره‌گیری از هوش مصنوعی در مدلسازی اطلاعات ساختمان
۵۹.....	ادغام هوش مصنوعی در زیرساخت سبز و تحلیل پایداری
۶۲.....	فصل ۳.....
۶۲.....	داده‌ها، پیش‌پردازش، ارزیابی و هوش مصنوعی توضیح‌پذیر در مهندسی عمران
۶۲.....	منابع داده در مهندسی عمران
۶۳.....	چالش‌های داده: کمبود، نویز، ناهمگنی، عدم‌توازن
۶۴.....	مراحل پیش‌پردازش برای انواع مختلف داده
۶۵.....	داده‌های جدولی
۶۶.....	نشانه‌گذاری و برچسب‌گذاری داده‌های تصویری
۶۷.....	داده‌های مصنوعی در تصاویر ساختمانی
۶۷.....	روش‌های پیش‌پردازش داده‌های تصویری
۶۸.....	مبانی و معماری الگوریتم‌های بینایی ماشین برای تشخیص آسیب سازه‌ای
۶۹.....	الگوریتم‌های بینایی ماشین برای طبقه‌بندی آسیب
۷۰.....	الگوریتم‌های بینایی ماشین برای مکان‌یابی آسیب
۷۳.....	تکنیک‌های پیش‌پردازش و افزایش داده
۷۳.....	داده‌های مصنوعی
۷۵.....	پاک‌سازی داده
۷۵.....	کاهش داده
۷۶.....	مقیاس‌بندی داده
۷۶.....	تبدیل داده

۷۶	افزایش داده
۷۷	آشکارساز تک مرحله‌ای تشخیص آسیب سازه‌ای
۷۷	محدودیت‌های مدل تشخیص دهنده اشیاء تک-شات چند-جعبه‌ای
۸۰	مدل‌های قطعه‌بندی پیکسل به پیکسل
۸۱	متریک‌های ارزیابی مدل
۸۱	مدلهای تشخیص جعبه مرزی
۸۲	R-CNN ، Fast R-CNN و Faster R-CNN
۸۳	الگوریتم‌های بینایی ماشین برای کمی‌سازی آسیب
۸۳	کمی‌سازی بر مبنای پیکسل‌های تصویر (روش‌های دوبعدی)
۸۴	کمی‌سازی مبتنی بر ابرنقاط سه‌بعدی
۸۴	کاربرد الگوریتم‌های بینایی ماشین در تشخیص آسیب سازه‌ای
۸۵	ارزیابی در سطح سیستم
۸۵	ارزیابی در سطح مؤلفه
۸۵	داده‌های تصویری
۸۷	فصل ۴
۸۷	هوش مصنوعی در مهندسی سازه، طراحی و پایش سلامت سازه
۸۸	تاریخچه مختصر هوش مصنوعی در پایش سلامت سازه
۸۹	ظهور هوش مصنوعی در پایش سلامت سازه
۹۰	ظهور یادگیری عمیق و بینایی ماشین در پایش سلامت سازه
۹۰	پیش‌بینی خواص مصالح
۹۲	هوش مصنوعی در پایش سلامت سازه‌ای مبتنی بر ارتعاش
۹۶	پایش سلامت سازه و تشخیص آسیب با بینایی ماشین

۹۶	پایش آسیب مبتنی بر بینایی
۹۷	تشخیص آسیب
۹۹	بهبود تعمیم‌پذیری تشخیص ترک
۱۰۰	تشخیص سایر انواع آسیب
۱۰۰	بازرسی هوایی و سیستم‌های تشخیص خوردگی
۱۰۲	کمی‌سازی آسیب
۱۰۶	تحلیل مقاومت
۱۰۶	عملکرد مدل با استفاده از داده‌های ترکیبی حسگرها
۱۰۷	توزیع دقت اعتبارسنجی متقابل
۱۰۷	بصری‌سازی فضای ویژگی با تحلیل مولفه‌های اصلی
۱۰۷	تحلیل اهمیت ویژگی‌ها
۱۰۸	سهم هر حسگر در ویژگی‌های مهم
۱۰۸	عملکرد مدل بر اساس هر نوع پیزوالکتریک به‌صورت جداگانه
۱۰۸	تفسیر عملکرد مدل و انتخاب ویژگی
۱۰۸	نوآوری روش‌شناختی در مهندسی خودکار ویژگی
۱۰۹	مقایسه با مطالعات پیشین
۱۰۹	کاربردهای عملی در پایش سلامت سازه‌ای
۱۱۰	بهینه‌سازی طراحی سازه
۱۱۲	پیش‌زمینه‌ای بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین
۱۱۴	هوش مصنوعی و طراحی سازه‌های فضاکار
۱۱۷	کاربرد هوش مصنوعی در طراحی سازه‌های ساختمانی
۱۲۲	خلاقیت و شهود

۱۲۷	مدلسازی پاسخ دینامیکی و کنترل ارتعاش
۱۲۷	رویکردهای مبتنی بر مدل اجزای محدود
۱۳۱	هوش مصنوعی در پایش سلامت سازه مبتنی بر ارتعاش
۱۳۲	فصل ۵
۱۳۲	هوش مصنوعی در مهندسی ژئوتکنیک
۱۳۲	خیزش هوش مصنوعی در ژئوتکنیک
۱۳۵	پیش بینی خواص خاک
۱۳۶	هوش مصنوعی و خواص فیزیکی
۱۳۹	برآورد چسبندگی
۱۴۰	پارامترهای تراکم خاک
۱۴۱	شاخص نسبت باربری کالیفرنیا
۱۴۱	تحلیل پایداری شیب، گسل و تونل سازی
۱۴۱	پایش هوشمند محل و مدلسازی زمین
۱۴۲	پیش بینی فضایی خواص ژئوتکنیکی
۱۴۳	پیش بینی رفتار خاک
۱۴۴	هوش مصنوعی و مدل های رفتاری سازه ای
۱۴۸	هوش مصنوعی و سایر کاربردها در ژئوتکنیک
۱۵۲	مدل های هیبریدی
۱۵۳	بهینه سازی طراحی ژئوتکنیکی، فرآیندهای ساخت و ساز و ارزیابی ریسک
۱۵۵	کاربرد در طراحی پی و دیوار حائل
۱۵۵	مهندسی پی
۱۵۶	هوش مصنوعی و خواص مکانیکی

فصل ۶.....	۱۶۲
هوش مصنوعی در حمل و نقل و ترافیک.....	۱۶۲
کاربردها در سیستم‌های پیشرفته حمل‌ونقل.....	۱۶۵
مدیریت ترافیک و کاهش تراکم ترافیک.....	۱۶۵
وسایل نقلیه متصل و خودران (CAVs).....	۱۶۸
سیستم‌های ادراک مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری عمیق.....	۱۶۹
الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر و تصمیم‌گیری.....	۱۶۹
ارتباطات V۲I و V۲V.....	۱۶۹
سیستم‌های پارکینگ هوشمند.....	۱۷۱
تشخیص خودکار در دسترس بودن پارکینگ با استفاده از IoT و یادگیری عمیق.....	۱۷۱
پیش‌بینی تقاضای پارکینگ و قیمت‌گذاری پویا.....	۱۷۲
ناوبری لحظه‌ای به سمت فضاهای پارکینگ موجود.....	۱۷۲
بهینه‌سازی حمل‌ونقل عمومی.....	۱۷۳
زمان‌بندی مبتنی بر هوش مصنوعی و بهینه‌سازی مسیرها.....	۱۷۳
پیش‌بینی تقاضای لحظه‌ای مسافران و مدیریت ناوگان.....	۱۷۴
ارائه توصیه‌های سفر شخصی‌سازی شده با استفاده از یادگیری ماشین.....	۱۷۴
حمل‌ونقل بار و لجستیک.....	۱۷۵
بهینه‌سازی مسیرهای تحویل و زنجیره‌های تأمین.....	۱۷۵
نگهداری پیش‌بینانه برای وسایل نقلیه ناوگان.....	۱۷۶
اتوماسیون انبار و مدیریت موجودی مبتنی بر هوش مصنوعی.....	۱۷۶
پایداری و اثرات زیست‌محیطی.....	۱۷۷
کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها با هوش مصنوعی.....	۱۷۷

۱۷۸	استقرار زیرساخت شارژ خودروهای الکتریکی
۱۷۸	برنامه‌ریزی حمل‌ونقل چندوجهی برای پایداری
۱۷۸	ارتقای ایمنی و امنیت
۱۷۹	سامانه‌های کمک‌راننده پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی (ADAS)
۱۷۹	تشخیص و پایش لحظه‌ای خطرات
۱۷۹	تحلیل پیش‌بینانه برای پیشگیری از تصادف
۱۸۰	امنیت سایبری در سامانه‌های حمل‌ونقل متصل
۱۸۰	پایش و نگهداری زیرساخت‌ها
۱۸۱	بازرسی مبتنی بر هوش مصنوعی از جاده‌ها، پل‌ها و تونل‌ها
۱۸۱	نگهداری پیش‌بینانه برای اطمینان‌پذیری بلندمدت
۱۸۱	جمع‌آوری داده مبتنی بر پهپاد و تحلیل خودکار
۱۸۲	مطالعات موردی و پیاده‌سازی‌های دنیای واقعی
۱۸۲	نمونه‌هایی از کاربردهای دنیای واقعی
۱۸۴	سیستم‌های پارکینگ هوشمند
۱۸۴	بهبود سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی
۱۸۵	لجستیک و حمل‌ونقل بار
۱۸۵	پایداری و طرح‌های سبز
۱۸۵	نتایج کاربردهای واقعی
۱۸۷	تأثیرات میان‌رشته‌ای
۱۸۸	چالش‌ها و محدودیت‌ها
۱۸۹	چالش‌های فنی
۱۹۰	چالش‌های عملیاتی و اجرایی

- ۱۹۲ چالش‌های اخلاقی و اجتماعی
- ۱۹۳ موانع مقرراتی و سیاست‌گذاری
- ۱۹۶ ادغام هوش مصنوعی با فناوری‌های نوظهور و رویکردهای آینده
- ۱۹۹ منابع و مراجع

هوش مصنوعی شاخه‌ای از علوم رایانه است که به طراحی و توسعه ماشین‌ها و سامانه‌هایی می‌پردازد که قادرند وظایفی را انجام دهند که به طور معمول مستلزم هوش انسانی است؛ وظایفی نظیر یادگیری، استدلال، تحلیل داده‌ها و حل مسئله. به بیان دیگر، هوش مصنوعی هنر و علم ساخت ماشین‌های هوشمند، به ویژه برنامه‌های رایانه‌ای هوشمند، به شمار می‌رود. این فناوری با شبیه‌سازی قابلیت‌های شناختی انسان در سامانه‌های محاسباتی، امکان یادگیری از داده‌ها، اصلاح خطاها و بهبود مستمر عملکرد را فراهم می‌آورد.

رشد شتابان هوش مصنوعی در دهه‌های اخیر مرهون دسترسی به حجم عظیمی از داده‌ها، توسعه الگوریتم‌های پیشرفته - از جمله یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی - و افزایش توان محاسباتی سامانه‌های رایانه‌ای بوده است. در نتیجه، این فناوری در حوزه‌های گوناگونی همچون بهداشت و درمان، آموزش، امور مالی و صنایع تولیدی به کار گرفته شده و راهکارهای نوینی برای ارتقای بهره‌وری، دقت و کیفیت تصمیم‌گیری ارائه داده است.

در این میان، مهندسی عمران به عنوان یکی از ارکان اساسی توسعه زیرساخت‌های مدرن، بیش از پیش تحت تاثیر ادغام هوش مصنوعی قرار گرفته است. این رشته که مسئولیت طراحی، ساخت و نگهداری محیط‌های فیزیکی و زیرساختی را بر عهده دارد، در مواجهه با پیچیدگی روز افزون پروژه‌ها و محدودیت منابع، نیازمند ابزارهایی نوین برای تحلیل، پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرایندها است. هوش مصنوعی با ارائه رویکردی تحول‌آفرین، شیوه برنامه‌ریزی، اجرا و مدیریت پروژه‌های عمرانی را دگرگون ساخته و زمینه‌های تازه‌ای برای نوآوری، پایداری و کارایی فراهم آورده است.

کاربردهای هوش مصنوعی در مهندسی عمران دامنه‌ای گسترده دارد و تقریباً تمامی مراحل چرخه عمر پروژه را در بر می‌گیرد؛ از تحلیل و طراحی سازه‌ها گرفته تا مدیریت ساخت، پایش سلامت سازه‌ها و نگهداری پیش‌بینانه. بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار سازه‌ای، پیش‌بینی عملکرد مصالح، برآورد مقاومت بتن در سنین اولیه، شناسایی آسیب‌های ناشی از زلزله در سازه‌های بتن‌آرمه و تشخیص زودهنگام خرابی‌ها را فراهم می‌سازد. افزون بر این، سامانه‌های نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی با پیش‌بینی خرابی تجهیزات و اجزای سازه‌ای، می‌توانند هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش داده و ایمنی و اطمینان زیرساخت‌ها را افزایش دهند.

از منظر نظری، هوش مصنوعی را می‌توان رویکردی در جهت «هوش تقویت‌شده» دانست؛ بدین معنا که به جای جایگزینی کامل نیروی انسانی، بر هم‌افزایی توانمندی‌های انسان و ماشین تأکید دارد. در چنین راهبردی، تصمیم‌گیری‌ها بر پایه داده‌های معتبر و تحلیل‌های پیشرفته صورت می‌گیرد و تعامل موثر میان مهندسان و سامانه‌های هوشمند، کیفیت و سرعت اجرای پروژه‌ها را ارتقا می‌بخشد. این همگرایی، امکان استانداردسازی دانش تخصصی و دسترس پذیر ساختن آن را برای طیف گسترده‌تری از کاربران فراهم می‌آورد.

با وجود مزایای گسترده، ادغام هوش مصنوعی در مهندسی عمران با چالش‌هایی نیز همراه است. کیفیت و دسترس‌پذیری داده‌ها، سوگیری الگوریتمی، نگرانی‌های مرتبط با حریم خصوصی، ملاحظات اخلاقی و اجتماعی، تهدیدات بالقوه برای اشتغال و نیز فقدان چارچوب‌های حقوقی و مقرراتی روشن از جمله موانع اساسی در مسیر توسعه این فناوری به شمار می‌روند. مدیریت این چالش‌ها مستلزم تدوین سیاست‌های راهبردی، ارتقای سواد داده‌ای متخصصان و ایجاد بسترهای قانونی و اخلاقی مناسب است.

بر این اساس، بررسی نظام‌مند کاربردها، فرصت‌ها و محدودیت‌های هوش مصنوعی در مهندسی عمران ضرورتی انکار ناپذیر است. پرداختن تحلیلی به این موضوع می‌تواند زمینه‌ساز بهبود فرآیندهای مهندسی، افزایش بهره‌وری منابع و ارائه راه‌حل‌های نوآورانه برای پاسخگویی به نیازهای پیچیده جوامع باشد.

گسترش فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در دهه‌های اخیر، چشم‌انداز مهندسی عمران را به طور بنیادین دگرگون ساخته است. این فناوری با تکیه بر تحلیل کلان‌داده‌ها، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های پیشرفته پیش‌بینی، امکان اجرای پروژه‌های عمرانی را با دقت بیشتر، هزینه کمتر و حداقل نقص و اختلال فراهم می‌آورد. دامنه کاربرد هوش مصنوعی در این حوزه بسیار گسترده بوده و از مرحله طراحی مفهومی تا بهره‌برداری و نگهداری سازه‌ها را در بر می‌گیرد.

در حوزه تحلیل و ارزیابی سازه‌ها، هوش مصنوعی نقش مؤثری در شناسایی، طبقه‌بندی و پیش‌بینی آسیب‌های سازه‌ای ایفا می‌کند. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که مدل‌هایی نظیر ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی بالایی در تشخیص آسیب‌های ناشی از زلزله، تحلیل رفتار قاب‌های بتن‌آرمه و ارزیابی وضعیت سازه‌ها دارند. برای نمونه، مطالعات تجربی نشان داده‌اند که ترکیب مدل‌های مختلف یادگیری ماشین می‌تواند دقت طبقه‌بندی آسیب را به طور چشمگیری افزایش دهد و ابزاری کارآمد برای ارزیابی سریع سازه‌ها پس از رویدادهای لرزه‌ای فراهم آورد. همچنین، استفاده از این مدل‌ها در شناسایی آسیب در پل‌های کابلی دهانه‌بلند و سازه‌های بتنی، قابلیت اطمینان و ایمنی سازه‌ای را بهبود بخشیده است.

در زمینه مصالح ساختمانی نیز الگوریتم‌های هوشمند برای پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی به کار گرفته شده‌اند. مقایسه عملکرد SVM و ANN در برآورد مقاومت فشاری بتن نشان می‌دهد که انتخاب مدل مناسب بسته به حجم و پیچیدگی داده‌ها می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد.

افزون بر این، کاربرد روش‌های یادگیری بیزی^۱ در مهندسی زلزله، شبکه‌های تابع پایه شعاعی در تحلیل قابلیت اطمینان سازه و شبکه‌های عصبی در شناسایی آسیب لرزه‌ای، بیانگر ظرفیت بالای این فناوری در مدیریت عدم قطعیت و بهبود تحلیل‌های مهندسی است. حتی در شرایطی که داده‌ها ناقص یا محدود باشند، روش‌های هوش مصنوعی قادرند ارزیابی سلامت سازه را با دقت قابل قبول انجام دهند.

در مرحله طراحی، تلفیق هوش مصنوعی با فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان تحولی چشمگیر ایجاد کرده است. یکپارچه‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین با محیط‌های BIM امکان استخراج و تحلیل خودکار داده‌های مرتبط با مصالح، شرایط محیطی، انرژی و عملکرد سازه را فراهم می‌کند. این هم‌افزایی منجر به تولید مدل‌های دیجیتال هوشمندی می‌شود که قابلیت زمان‌بندی فعالیت‌ها، شبیه‌سازی رفتار سازه، برآورد هزینه و حتی تولید خودکار نقشه‌ها را دارا هستند. بدین ترتیب، فرآیند طراحی به سمت تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و بهینه‌سازی چندمعیاره سوق می‌یابد. تحلیل زمان و هزینه پروژه‌ها نیز از دیگر حوزه‌های کلیدی کاربرد هوش مصنوعی است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین با بهره‌گیری از داده‌های پروژه‌های پیشین می‌توانند الگوهای افزایش هزینه، تأخیرهای زمانی و ریسک‌های بالقوه را شناسایی کنند. این قابلیت به مهندسان و مدیران پروژه کمک می‌کند تا بودجه‌بندی دقیق‌تری انجام داده و برنامه‌ریزی زمان‌بندی را با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف ریسک، بهینه سازند.

^۱ Bayesian Method

در مرحله اجرای پروژه، کاربرد رباتیک و سامانه‌های بینایی ماشین^۱ مبتنی بر هوش مصنوعی نقش فزاینده‌ای یافته است. ربات‌های مجهز به دوربین قادرند تصاویر سه‌بعدی از کارگاه تهیه کرده و با مقایسه آنها با مدل‌های دیجیتال، میزان پیشرفت پروژه را پایش کنند. افزون بر این، ماشین‌های هوشمند می‌توانند در عملیات خاکبرداری، جانمایی فونداسیون، اجرای بنایی و ساخت اجزای پیچیده مشارکت داشته باشند. این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری، ایمنی کارگاه را ارتقا داده و امکان تمرکز نیروی انسانی بر فعالیت‌های تخصصی‌تر و خلاقانه‌تر را فراهم می‌آورد.

از منظر مدیریتی، هوش مصنوعی در حوزه‌های مدیریت کیفیت، بهینه‌سازی طراحی، نگهداری و تعمیرات و کنترل ریسک نیز کاربرد گسترده دارد. سامانه‌های نگهداری پیش‌بینانه می‌توانند با تحلیل داده‌های عملکردی تجهیزات و سازه‌ها، احتمال خرابی را پیش‌بینی کرده و از توقف‌های ناگهانی و هزینه‌های اضافی جلوگیری کنند. این امر به افزایش اطمینان زیرساخت‌ها و بهبود مدیریت چرخه عمر ابنیه عمرانی منجر می‌شود.

از نظر روش‌شناسی، شاخه‌هایی همچون یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، منطق فازی، شناسایی الگو، درخت‌های تصمیم، بهینه‌سازی ازدحامی و محاسبات تکاملی از مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در مهندسی عمران به شمار می‌روند. در میان این روش‌ها، شبکه‌های عصبی، یادگیری عمیق و تکنیک‌های شناسایی الگو نقش برجسته‌تری در حل مسائل پیچیده سازه‌ای و مدیریتی دارند؛ زیرا توانایی استخراج روابط غیرخطی و پنهان در داده‌های حجیم را دارا هستند.

در مجموع، هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری راهبردی در مهندسی عمران، نه‌تنها موجب افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها می‌شود، بلکه کیفیت تصمیم‌گیری، ایمنی سازه‌ها و کارایی فرآیندهای اجرایی را نیز بهبود می‌بخشد. حرکت به سوی مهندسی عمران داده‌محور و هوشمند، بیانگر گذار این رشته از رویکردهای سنتی به سوی سامانه‌های یکپارچه و تحلیلی است که در آنها تعامل موثر میان انسان و ماشین، مبنای تحقق پروژه‌های پایدار و ایمن در مقیاس‌های گوناگون خواهد بود.

بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که هوش مصنوعی به‌عنوان یک سامانه تخصصی و داده‌محور، قادر است فرآیندهای تصمیم‌گیری در مهندسی عمران را ساده‌تر، سریع‌تر و کارآمدتر سازد. این فناوری با شبیه‌سازی و روباتیزه کردن رفتارهای هوشمند، امکان تحلیل مسائل پیچیده، پیش‌بینی رفتار سازه‌ها و بهینه‌سازی فرآیندهای اجرایی را فراهم می‌کند.

هوش مصنوعی ماهیتی میان‌رشته‌ای دارد و بر تعامل حوزه‌هایی چون علوم رایانه، نظریه اطلاعات، روان‌شناسی شناختی و علوم اعصاب استوار است. این پیوند میان‌رشته‌ای موجب شده است که الگوریتم‌های یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی، مدل‌های فازی و روش‌های تکاملی در طیف گسترده‌ای از شاخه‌های مهندسی عمران به کار گرفته شوند.

در حوزه مهندسی و مدیریت ساخت، سیستم‌های استنتاج عصبی-فازی و مدل‌های یادگیری ماشین توانسته‌اند رفتار پیچیده مصالح سیمانی در شرایط آسیب‌های چندگانه را مدل‌سازی کنند و مبنایی برای تدوین راهبردهای بهینه مدیریت پروژه فراهم آورند. بهره‌گیری از ماشین‌های خودکار و سامانه‌های هوشمند در مرحله برنامه‌ریزی و اجرا،

^۱ Machine Vision

زمان تولید مدل‌های سه‌بعدی و نقشه‌های اجرایی را به‌طور چشمگیری کاهش داده و موجب صرفه‌جویی در منابع شده است.

در مهندسی سازه، کاربرد شبکه‌های عصبی و روش‌های زیرسازی برای تشخیص آسیب، تحلیل استاتیکی و دینامیکی و ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌ها نتایج قابل توجهی به همراه داشته است. به‌عنوان نمونه، استفاده از شبکه‌های تابع پایه شعاعی بهبود یافته در تحلیل قابلیت اطمینان سازه، دقت پیش‌بینی را نسبت به روش‌های سنتی به‌طور معناداری افزایش داده است. همچنین مطالعات مبتنی بر داده‌های مودال^۱ نشان داده‌اند که شبکه‌های عصبی می‌توانند آسیب‌های لرزه‌ای را با دقتی بالاتر از روش‌های بازرسی متعارف شناسایی کنند؛ موضوعی که برای ایمنی سازه‌ها در مناطق زلزله‌خیز اهمیت حیاتی دارد.

در مهندسی حمل‌ونقل، مدل‌سازی مبتنی بر عامل و سیستم‌های مبتنی بر دانش در تحلیل شبکه‌های پیچیده ترافیکی و پیش‌بینی شکست شیب‌های بزرگراهی کاربرد یافته‌اند. در حوزه ژئوتکنیک، شبکه‌های عصبی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک و تحلیل رفتار غیرخطی زمین به‌کار گرفته شده‌اند. افزون بر این، شبکه‌های عصبی پیشرفته نظیر Faster R-CNN در تشخیص همزمان آسیب‌های سطحی سازه‌ها (ترک، خوردگی، جداشدگی لایه‌ها و...) عملکرد مؤثری نشان داده‌اند. نمونه‌های عملی نیز کارآمدی این فناوری را تأیید می‌کنند.

سامانه‌های نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی در برخی پروژه‌های حمل‌ونقل، کاهش قابل توجه زمان از کارافتادگی تجهیزات و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به همراه داشته‌اند. همچنین در پروژه‌های زیرساختی بزرگ، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در مرحله طراحی و ساخت، موجب صرفه‌جویی در مصرف مصالح، کاهش زمان اجرا و بهبود پایداری زیست‌محیطی شده است. در حوزه مدیریت ترافیک شهری نیز بهینه‌سازی چراغ‌های راهنمایی با مدل‌های یادگیری ماشین، کاهش تراکم و انتشار آلاینده‌ها را در پی داشته است.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، بررسی‌ها نشان می‌دهد که همچنان شکاف‌های مهمی در کاربرد هوش مصنوعی در مهندسی عمران وجود دارد. یکی از مهم‌ترین این شکاف‌ها، توجه ناکافی به ابعاد اخلاقی، اجتماعی و هزینه‌های چرخه عمر پروژه‌ها می‌باشد. مسائلی همچون تهدید اشتغال، سوگیری الگوریتمی، نقض حریم خصوصی و نبود چارچوب‌های حقوقی شفاف، از جمله دغدغه‌های جدی در مسیر توسعه این فناوری محسوب می‌شوند.

از منظر فنی، کیفیت و دسترسی‌پذیری داده‌ها چالشی اساسی است. عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی به شدت وابسته به داده‌های دقیق و گسترده است؛ در حالی که در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، داده‌ها ناقص، پراکنده یا فاقد استانداردسازی مناسب هستند. افزون بر این، ادغام سامانه‌های هوشمند با فرآیندهای سنتی سازمان‌ها نیازمند زیرساخت‌های محاسباتی و مهارت‌های تخصصی پیشرفته است که در همه نهادها فراهم نیست.

کمبود پژوهش‌های میان‌رشته‌ای که مهندسی عمران، علوم رایانه و علوم اجتماعی را به‌صورت یکپارچه بررسی کنند نیز از دیگر کاستی‌های موجود است. تمرکز بسیاری از مطالعات بر آزمونهای آزمایشگاهی یا داده‌های معیار بوده و تحقیقات مبتنی بر پروژه‌های واقعی و در مقیاس صنعتی هنوز به اندازه کافی توسعه نیافته است.

برای غلبه بر چالش‌های موجود، اتخاذ رویکردی نظام‌مند ضروری است. مدیریت جامع داده‌ها، توسعه استانداردهای جمع‌آوری و پیش‌پردازش اطلاعات و ایجاد پایگاه‌های داده معتبر، از پیش‌شرط‌های اساسی موفقیت هوش مصنوعی در مهندسی عمران به شمار می‌رود.

^۱ Modal Data

در حوزه اخلاق و حکمرانی فناوری، تدوین چارچوب‌های مبتنی بر شفافیت، پاسخگویی و انصاف ضروری است. همچنین ایجاد مقررات مشخص و پایدار برای کاربرد هوش مصنوعی در پروژه‌های عمرانی می‌تواند ریسک‌های حقوقی و اجتماعی را کاهش دهد. آموزش و بازآموزی نیروی انسانی نیز به‌عنوان راهبردی کلیدی برای سازگاری با تحولات فناورانه و کاهش پیامدهای منفی اشتغال مطرح می‌شود.

از منظر نظری، بهره‌گیری از مدل‌هایی نظیر مدل پذیرش فناوری (TAM) و نظریه انتشار نوآوری می‌تواند در تحلیل عوامل مؤثر بر پذیرش هوش مصنوعی در صنعت ساخت‌وساز مفید باشد. این چارچوب‌ها بر درک سودمندی، سهولت استفاده و تأثیرات اجتماعی فناوری تأکید دارند و می‌توانند مبنایی برای تدوین راهبردهای پیاده‌سازی موفق فراهم آورند.

یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهد که ادغام هوش مصنوعی در مهندسی عمران می‌تواند به افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها، بهبود ایمنی و ارتقای پایداری منجر شود. سامانه‌های پایش سلامت سازه، مدل‌های پیش‌بینی آسیب و ابزارهای بهینه‌سازی طراحی، زمینه‌ساز شکل‌گیری زیرساخت‌هایی بادوام‌تر و قابل اعتمادتر خواهند بود. با این حال، توسعه آینده این حوزه باید بر طراحی مدل‌هایی متمرکز شود که با داده‌های محدود و هزینه محاسباتی کمتر نیز عملکرد مطلوبی داشته باشند. همچنین توجه عمیق‌تر به پیامدهای اجتماعی و اخلاقی، انطباق با قوانین موجود و گسترش پژوهش‌های مبتنی بر پروژه‌های واقعی از الزامات پیشرفت پایدار این فناوری است.

برآیند تحلیل‌ها نشان می‌دهد که هوش مصنوعی به یکی از ارکان تحول‌آفرین مهندسی عمران تبدیل شده است. این فناوری با فراهم ساختن ابزارهای پیشرفته برای تحلیل داده، پیش‌بینی رفتار سازه‌ای، مدیریت پروژه و نگهداری زیرساخت‌ها، ظرفیت آن را دارد که کیفیت، بهره‌وری و پایداری را به‌طور هم‌زمان ارتقا دهد.

با این حال، تحقق کامل این ظرفیت مستلزم مدیریت هوشمندانه چالش‌های فنی، اخلاقی و نهادی است. در صورتی که چارچوب‌های داده‌ای، مقرراتی و آموزشی به درستی طراحی و اجرا شوند، هم‌افزایی تخصص انسانی و سامانه‌های هوشمند می‌تواند آینده‌ای پایدار، ایمن و کارآمد برای مهندسی عمران رقم بزند.

در ادامه، با هدف ارائه یک گردآوری جامع و نظام‌مند از مطالعات موجود، به بررسی دقیق کاربردهای هوش مصنوعی در شاخه‌های مختلف مهندسی عمران، راهکارهای نوین فنی و عملی، و چالش‌های پیش روی این فناوری — از جمله مسائل داده‌ای، تفسیرپذیری، اخلاقی و پذیرش صنعتی — می‌پردازیم. این مجموعه دوجلدی تلاش دارد پلی میان مبانی نظری و نیازهای واقعی صنعت ایجاد کند و با تمرکز ویژه بر شرایط ایران (مدیریت ریسک زلزله، منابع آب، توسعه پایدار زیرساخت‌ها و پروژه‌های کلان ملی) به ارتقای بهره‌وری، ایمنی، پایداری و هوشمندسازی صنعت ساخت‌وساز کمک نماید.

امید است این کتاب نه تنها مرجعی ارزشمند برای دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری، پژوهشگران و اساتید حوزه مهندسی عمران باشد، بلکه مهندسان حرفه‌ای، مدیران پروژه، سیاست‌گذاران و دست‌اندرکاران صنعت را نیز در بهره‌گیری هوشمندانه و مسئولانه از هوش مصنوعی یاری رساند و گامی مؤثر در جهت تحول دیجیتال و توسعه پایدار کشور بردارد.

فصل ۱

زمینه‌های پیدایش، تکامل، چالش‌ها و آینده هوش مصنوعی

تاریخچه و تکامل هوش مصنوعی

هوش مصنوعی^۱ ریشه در اواسط قرن بیستم دارد؛ زمانی که آلن تورینگ ایده‌ای را مطرح کرد مبنی بر اینکه ماشین‌ها می‌توانند جنبه‌هایی از هوش انسانی را شبیه‌سازی کنند. اصطلاح «هوش مصنوعی» به‌طور رسمی در سال ۱۹۵۶ و در کنفرانس دارتموث ابداع شد؛ رویدادی که آغاز شکل‌گیری هوش مصنوعی به‌عنوان یک رشته دانشگاهی مستقل را رقم زد.

در دهه‌های بعد، این حوزه از استدلال نمادین و سیستم‌های مبتنی بر قواعد به پارادایم‌های یادگیری داده‌محور تکامل یافت. شکل ۱-۱ جدول زمانی‌ای را ارائه می‌دهد که نقاط عطف اصلی در توسعه هوش مصنوعی را برجسته می‌کند؛ از منطق نمادین اولیه و سیستم‌های ویژه در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، تا ظهور یادگیری ماشین^۲ در دهه ۱۹۸۰، احیای شبکه‌های عصبی^۳ در دهه ۲۰۰۰، و پیشرفت‌های سریع در یادگیری عمیق^۴ و مدل‌های زبانی ساده در دهه گذشته. امروزه هوش مصنوعی طیف گسترده‌ای از روش‌ها را در بر می‌گیرد، از جمله یادگیری نظارت‌شده و یادگیری بدون نظارت، یادگیری تقویتی و بهینه‌سازی فرا ابتکاری^۵ که ماشین‌ها را قادر می‌سازد وظایفی نظیر تشخیص الگو، کنترل خودکار و تصمیم‌گیری لحظه‌ای را انجام دهند.

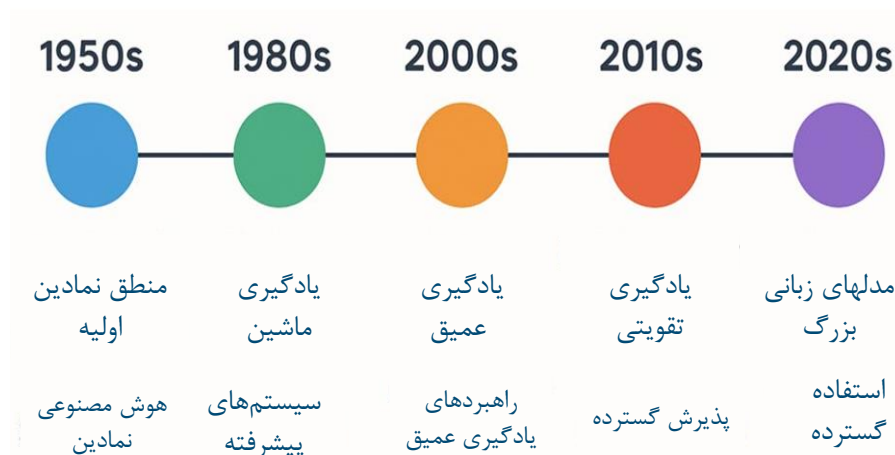
^۱ Artificial Intelligence

^۲ Machine Learning

^۳ Neural Networks

^۴ Deep Learning

^۵ Metaheuristic Algorithms



شکل ۱-۱ نقاط عطف اصلی هوش مصنوعی طی دهه‌های گذشته.

زبان‌های برنامه نویسی پرکاربرد در توسعه هوش مصنوعی شامل پایتون، آر و متلب هستند، در حالی که چارچوب‌های مدرنی نظیر تنسورفلو^۱ و پای تورچ^۲ گسترش و ثبات سیستم‌های یادگیری عمیق و پیچیده را تسریع کرده‌اند. تأثیر گسترده هوش مصنوعی اکنون در صنایع متعددی مشهود است و کاربردهای آن در مقیاس بزرگ، مانند چت جی‌پی‌تی^۳، عمق و گستره هوش ماشینی را نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر، یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی در مهندسی عمران از کاوش نظری به گسترش و تثبیت عملی تغییر جهت داده است. تکنیک‌های هوش مصنوعی اکنون در سراسر چرخه پروژه — از مشخصه‌یابی مصالح و طراحی سازه‌ای تا مدل‌سازی ژئوتکنیکی و پیش‌بینی جریان ترافیک — مورد پذیرش قرار گرفته‌اند. این گذار ناشی از دیجیتالی‌شدن فزاینده صنعت ساخت‌وساز، دسترسی به داده‌های میدانی و محدودیت‌های مدل‌های متداول در سنجش رفتارهای پیچیده و غیرخطی بوده است. همانگونه که در شکل ۱-۲ نشان داده شده، کاربردهای هوش مصنوعی در مهندسی عمران حوزه‌های متعددی را در بر می‌گیرد؛ از جمله پیش‌بینی مقاومت بتن، پایش سلامت سازه، مهندسی ژئوتکنیک، سیستم‌های حمل‌ونقل، مدیریت منابع آب و زلزله. برای نمونه، شبکه‌های عصبی به طور

^۱ TensorFlow

^۲ PyTorch

^۳ ChatGPT

گسترده برای مدل سازی مقاومت فشاری بتن بر اساس متغیرهای طرح اختلاط، شرایط عمل آوری و عوامل محیطی به کار رفته اند و اغلب عملکردی برتر از رویکردهای رگرسیون سنتی نشان داده اند.

در مهندسی سازه نیز سیستم های هیبریدی^۱ هوش مصنوعی که یادگیری ماشینی را با الگوریتم های بهینه سازی ترکیب می کنند، در پیش بینی بار و تشخیص آسیب نتایج نویدبخشی ارائه کرده اند. به طور مشابه، در ژئوتکنیک، مدل های گروهی^۲ برای پیش بینی شکست شیب و ارزیابی پتانسیل روانگرایی با قابلیت اطمینان بهبود یافته به کار گرفته شده اند. در حوزه حمل و نقل نیز الگوریتم های یادگیری عمیق به بهینه سازی کنترل چراغ های راهنمایی و رانندگی و پیش بینی تراکم ترافیک کمک می کنند. این کاربردهای متنوع، ارزش رو به رشد هوش مصنوعی را در ارتقای دقت، کارایی و تاب آوری در محیط ساخته شده برجسته می سازد.



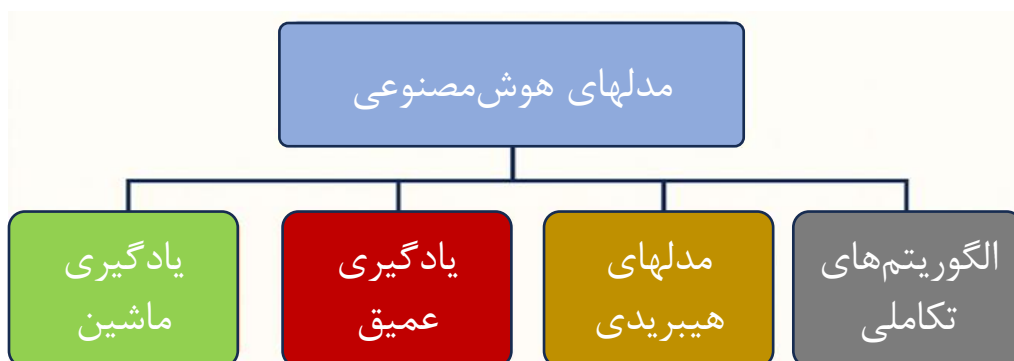
شکل ۱-۲ کاربردهای هوش مصنوعی در مهندسی عمران

طیف گسترده ای از مدل های هوش مصنوعی در مهندسی عمران به کار گرفته شده اند که هر یک، بسته به ماهیت، پیچیدگی و میزان دسترسی به داده های مسئله، مزایای منحصر به فردی ارائه می دهند. این مدل ها عموماً به چهار دسته

^۱ Hybrid Models

^۲ Ensembles Models

اصلی تقسیم می‌شوند: مدل‌های یادگیری ماشین کلاسیک، معماری‌های یادگیری عمیق، مدل‌های هیبریدی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری.



شکل ۱-۳ طبقه‌بندی استفاده مدل‌های هوش مصنوعی در مهندسی عمران.

کاربردها	تکنیک‌های متداول	دسته‌بندی مدل‌ها
طبقه‌بندی، رگرسیون، تشخیص ویژگی‌های خاک	Decision Trees, SVM, Random Forest, k-NN	یادگیری ماشین
تشخیص ترک‌ها، پیش‌بینی‌های سری‌زمانی، عیب‌یابی مبتنی بر تصویر	CNN, LSTM, DBN	یادگیری عمیق
بهینه‌سازی هاپرپارامترها، پیش‌بینی مقاومت بتن	ANN-PSO, SVM-GA	مدل‌های هیبریدی
بهینه‌سازی سازه‌ها، طراحی مصالح، برنامه‌ریزی	Genetic Algorithm, Ant Colony Optimization, Firefly Algorithm	الگوریتم‌های فرا ابتکاری

جدول ۱-۱ طبقه‌بندی استفاده مدل‌های هوش مصنوعی در مهندسی عمران

مدل‌های یادگیری ماشینی کلاسیک نظیر درخت تصمیم^۱، جنگل تصادفی^۲، ماشین بردار پشتیبان^۳ و K-NN به‌طور گسترده برای وظایفی مانند طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شوند؛ به‌ویژه در مسائلی مرتبط با پیش‌بینی خواص خاک و عملکرد مصالح که مجموعه داده‌ها ساختارمند و نسبتاً محدود هستند. در مقابل، برای وظایفی که شامل تشخیص تصویر در مقیاس بزرگ یا داده‌های زمانی لحظه‌ای - نظیر تشخیص آسیب سازه‌ای یا پیش‌بینی بار - هستند، مدل‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی^۴، حافظه بلند کوتاه‌مدت^۵ و شبکه‌های باور

^۱ DT: Decision Tree

^۲ RF: Random Forest

^۳ SVM: Support Vector Machine

^۴ CNN: Convolutional Neural Networks

^۵ LSTM: Long Short-Term Memory