

کاربرد هوش مصنوعی جغرافیایی (GeoAI) در مدیریت و برنامه‌ریزی شهری

محسن قدس^۱

نوع مقاله: علمی مروری

صفحه ۹۵ تا ۱۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

چکیده

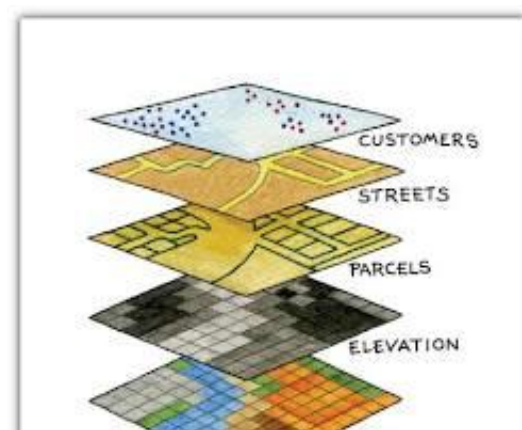
این مقاله به مروری جامع در زمینه کاربرد هوش مصنوعی جغرافیایی (GeoAI) در حوزه مدیریت و برنامه‌ریزی شهری می‌پردازد. با رشد روزافزون داده‌های مکانی و افزایش نیاز به تحلیل‌های دقیق در فرآیندهای شهری، فناوری GeoAI با تلفیق الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تحلیل‌های پیشرفته و تجسم سه‌بعدی، نقش مهمی در شناسایی الگوهای پیچیده و پیش‌بینی روندهای رشد و تغییر کاربری مناطق ایفا می‌کند. در این مطالعه، ابتدا مفاهیم پایه‌ای و چارچوب نظری GeoAI تشریح شده و سپس کاربردهای عملی آن در مدیریت منابع و کاربری اراضی شهری، پایش آلودگی و ارزیابی زیست‌محیطی، مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده، تحلیل شبکه‌های حمل و نقل مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از GeoAI با ترکیب داده‌های حاصل از سنجش از دور، حسگرهای اینترنت اشیا و نقشه‌های دیجیتال، به مدیران شهری این امکان را می‌دهد تا با دسترسی به اطلاعات به‌روز و دقیق، تصمیمات استراتژیک در راستای توسعه پایدار را اتخاذ نمایند. این فناوری با تحلیل همزمان داده‌های فضایی و توصیفی، نقاط ضعف و قوت سیستم‌های موجود را شناسایی و راهکارهای بهینه جهت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع شهری ارائه می‌دهد. علاوه بر این، بکارگیری GeoAI موجب کاهش هزینه‌های اجرایی، افزایش کارایی در تخصیص منابع و بهبود کیفیت خدمات شهری می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی جغرافیایی به عنوان ابزاری تحول‌آفرین در برنامه‌ریزی شهری، می‌تواند نقش بسزایی در ایجاد شهرهای هوشمند، پویاتر و پایدار داشته باشد. مقاله علاوه بر ارائه چارچوب مفهومی، پیشنهاداتی جهت توسعه بیشتر فناوری‌های مرتبط و ادغام آن‌ها با سیستم‌های مدیریت شهری ارائه نموده و افق‌های جدیدی را در بهبود عملکرد شهری ترسیم می‌کند.

واژگان کلیدی: هوش مصنوعی جغرافیایی، GeoAI، مدیریت شهری، برنامه‌ریزی شهری، داده‌های مکانی، یادگیری ماشین، شهر هوشمند، GIS

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران، (نویسنده مسئول) mohsen.ghods@semnaniau.ac.ir

مقدمه

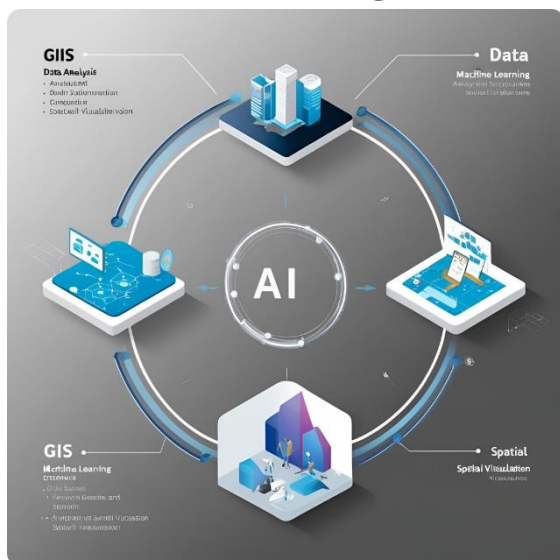
همانطور که می‌دانیم GIS یک سیستم کامپیوتری است که برای جمع‌آوری، مدیریت و تحلیل داده‌های مکانی استفاده می‌شود. این داده‌ها می‌توانند شامل هر چیزی از نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای گرفته تا اطلاعات جمعیتی و آماری باشند. GIS به ما این امکان را می‌دهد تا دنیای اطراف خود را به صورت دیجیتالی مدل‌سازی کنیم و روابط بین پدیده‌های مختلف را بهتر درک کنیم (کیرلنکو، ۲۰۲۲). برخی از کاربردهای GIS در زمینه برنامه‌ریزی شهری شامل ارزیابی تأثیر پروژه‌های عمرانی (سینجاری و کوسووراستی، ۲۰۱۵)، مدیریت ترافیک (وانگ و ژانگ، ۲۰۲۴) و برنامه‌ریزی استفاده از زمین (یوسف و ابوالقادر، ۲۰۲۳)، در زمینه مدیریت منابع طبیعی شامل نظارت بر جنگل‌ها، مزارع و منابع آب (کوکوپهلیوان و دیگران، ۲۰۲۳)، در زمینه مدیریت بحران شامل پاسخگویی به حوادث طبیعی مانند زلزله و سیل و کاربردهای دیگر می‌باشد (عبدالرحمان، ۲۰۲۵). شکل ۱ لایه‌های مختلف اطلاعاتی در یک نقشه حاصل از GIS را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نقشه GIS در لایه‌های مختلف اطلاعاتی

از طرفی دیگر هوش مصنوعی^۲ (AI) شاخه‌ای از علوم کامپیوتر است که به ساخت ماشین‌هایی با توانایی انجام کارهایی که معمولاً نیازمند هوش انسانی هستند، می‌پردازد. این موضوع شامل توانایی یادگیری^۳، استدلال^۴، حل مسئله^۵ و درک و پردازش زبان طبیعی^۶ است (راسل و نورویگ، ۲۰۲۰).

انواع هوش مصنوعی عبارتند از: هوش مصنوعی ضعیف^۷ که این نوع هوش مصنوعی برای انجام یک کار خاص طراحی شده است، مانند تشخیص چهره یا بازی شطرنج و هوش مصنوعی عمومی^۸ که این نوع هوش مصنوعی دارای توانایی یادگیری و انجام هر کاری که یک انسان می‌تواند انجام دهد، است (لیتو، ۲۰۲۱). ترکیب GIS و هوش مصنوعی منجر به ایجاد یک ابزار قدرتمند برای تحلیل داده‌های مکانی و استخراج اطلاعات ارزشمند می‌شود. این ترکیب به نام GeoAI^۹ شناخته می‌شود (سو و گودچایلد، ۲۰۱۸). رابطه بین GIS و AI را نشان می‌دهد.



شکل ۲. رابطه بین GIS و AI

^۶ Natural Language Processing

^۷ Narrow AI

^۸ General AI

^۹ Geospatial Artificial Intelligence

^۲ Artificial Intelligence

^۳ Artificial Intelligence Learning

^۴ Artificial Intelligence Argument

^۵ Problem Solving

برخی از کاربردهای GeoAI عبارتند از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، برای شناسایی تغییرات در پوشش زمین (گو و ژنگ، ۲۰۲۴)، تشخیص مناطق آسیب‌دیده (براون و گرین، ۲۰۲۴) پیش‌بینی بلایای طبیعی (زضوانی و دیگران، ۲۰۲۳)، مدل‌سازی و پیش‌بینی، برای مثال مدل‌سازی و پیش‌بینی ترافیک (شائو و دیگران، ۲۰۲۴)، مدل‌سازی و پیش‌بینی آلودگی هوا (رابینسون و دیگران، ۲۰۱۸) و مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی (شارما و دیگران، ۲۰۲۳)، خودکارسازی فرآیندها برای انجام کارهای تکراری و زمان‌بر به صورت خودکار (کوهن و بالوتره، ۲۰۲۳)، درک بهتر پدیده‌های پیچیده برای شناسایی روابط بین پدیده‌های مختلف در محیط جغرافیایی (لی و گودچایلد، ۲۰۲۰).

ترکیب GIS و هوش مصنوعی تحولی عظیم در نحوه تحلیل و درک داده‌های مکانی ایجاد کرده است. این ترکیب، برای تحلیل داده‌های پیچیده و حجیم بسیار مناسب است. زیرا هوش مصنوعی قادر است حجم عظیمی از داده‌های مکانی را با سرعت بسیار بالا پردازش کرده و الگوها و روابط پیچیده‌ای را که با روش‌های سنتی قابل تشخیص نیستند، شناسایی کند. همچنین الگوریتم‌های یادگیری ماشین^{۱۰} می‌توانند با دقت بسیار بالایی ویژگی‌های مختلف را در تصاویر ماهواره‌ای و سایر داده‌های مکانی تشخیص دهند (رانه و دیگران، ۲۰۲۴). از طرفی دیگر ترکیب GIS و هوش مصنوعی قابلیت پیش‌بینی‌های دقیق‌تر را فراهم می‌آورد. زیرا با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، می‌توان پدیده‌های پیچیده‌ای مانند تغییرات آب و هوایی، گسترش بیماری‌ها و تغییرات در پوشش زمین را با دقت بیشتری پیش‌بینی کرد.

پیش‌بینی‌های دقیق‌تر به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی بهتر و تصمیمات آگاهانه‌تری اتخاذ کنند (خان و دیگران، ۲۰۲۳). ترکیب GIS و هوش مصنوعی امکان خودکارسازی فرایندها را فراهم می‌کند. بسیاری از فرآیندهای تکراری و زمان‌بر در GIS می‌توانند با استفاده از هوش مصنوعی خودکار شوند و در نتیجه هزینه‌ها کاهش یابد. خودکارسازی فرآیندها به کارشناسان GIS اجازه می‌دهد تا بر روی کارهای پیچیده‌تر و خلاقانه‌تر تمرکز کنند (لی و نینگ، ۲۰۲۳). این ترکیب موجب درک بهتر پدیده‌های جغرافیایی می‌شود. هوش مصنوعی می‌تواند روابط پیچیده بین پدیده‌های جغرافیایی را کشف کند که با روش‌های سنتی قابل تشخیص نیستند (لی و دیگران، ۲۰۲۲). با ترکیب داده‌های مختلف و استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، می‌توان به درک جامع‌تری از پدیده‌های جغرافیایی دست یافت، تصمیمات بهتری اتخاذ کرد و به چالش‌های پیچیده جهان پاسخ داد. (لی و گودچایلد، ۲۰۲۰).

مروری بر تاریخچه و روند توسعه این دو حوزه

در دهه ۱۹۶۰ با ظهور کامپیوترها و پیشرفت‌های سخت‌افزاری، امکان پردازش داده‌های مکانی به صورت دیجیتال فراهم شد. راجر تاملینسون با ایجاد سیستم اطلاعات جغرافیایی کانادا (CGIS)^{۱۱}، نقش مهمی در شکل‌گیری GIS مدرن ایفا کرد. در دهه ۱۹۷۰ شرکت‌های تجاری اولین نسخه‌های تجاری GIS را توسعه دادند و GIS به عنوان یک ابزار علمی و کاربردی شناخته شد (فورسمن، ۱۹۸۸). در دهه ۱۹۸۰ با پیشرفت رایانه‌ها، GIS به سرعت توسعه یافت و در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفت (اپنشاو، ۱۹۹۱). با گسترش کاربردهای GIS در حوزه‌های مختلف

^{۱۱} Canada Geographic Information System^{۱۰} Machine Learning (ML)

از برنامه‌ریزی شهری و مدیریت منابع طبیعی تا تحلیل بازار و مدیریت بحران، به کار گرفته شد. با کاربردی‌تر شدن GIS، نرم‌افزارهای GIS قدرتمندتر و کاربرپسندتر شدند و امکانات تحلیل و نمایش داده‌های مکانی افزایش یافت. انتشار داده‌های مکانی به صورت آزاد^{۱۲}، دسترسی به اطلاعات جغرافیایی را برای عموم آسان‌تر شد (گودچایلد، ۲۰۰۹). با تلفیق GIS با سایر فناوری‌ها همانند سنجش از دور، اینترنت اشیا و واقعیت مجازی کاربردهای جدیدی قابل تصور و استفاده شد (صفری بازرگانی و دیگران، ۲۰۲۱). در خصوص تاریخچه هوش مصنوعی نیز ابتدا در دهه ۱۹۵۰، مفهوم هوش مصنوعی در کنفرانسی در دارتموث^{۱۳} مطرح شد و تحقیقات در این زمینه آغاز شد. در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ پیشرفت‌هایی در زمینه برنامه‌نویسی منطقی و سیستم‌های خبره حاصل شد (مینکر، ۲۰۰۲). اما در دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰، به دلیل عدم تحقق وعده‌های اولیه، زمستان هوش مصنوعی بود و سرمایه‌گذاری‌ها در حوزه هوش مصنوعی کاهش یافت (بروسارد، ۲۰۲۳). ولی در دهه ۱۹۹۰ با پیشرفت رایانه‌ها و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، هوش مصنوعی دوباره مورد توجه قرار گرفت (لکان و دیگران، ۲۰۱۵). الگوریتم‌های یادگیری ماشین^{۱۴} به سیستم‌ها اجازه دادند تا از داده‌ها یاد بگیرند و پیش‌بینی کنند (مهری و دیگران، ۲۰۲۱). یادگیری عمیق^{۱۵} و شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۶} با لایه‌های متعدد، توانایی یادگیری ویژگی‌های پیچیده از داده‌ها را فراهم کردند (الزبیدی و دیگران، ۲۰۲۱) و یادگیری تقویتی^{۱۷} به سیستم‌ها

اجازه داد تا از طریق تعامل با محیط یاد بگیرند و تصمیمات بهتری بگیرند. همین موضوع باعث شد تا هوش مصنوعی در حوزه‌های مختلفی مانند پردازش زبان طبیعی، بینایی کامپیوتری^{۱۸}، رباتیک و خودروهای خودران کاربرد یابد (خان و دیگران، ۲۰۲۳). در دهه‌های اخیر با افزایش حجم داده‌های مکانی و پیشرفت‌های هوش مصنوعی، تلفیق این دو حوزه به سرعت توسعه یافت و GeoAI در حوزه‌های مختلفی مانند پیش‌بینی بلایای طبیعی، مدیریت شهری، کشاورزی هوشمند و حفظ محیط زیست کاربرد یافت. با پیشرفت فناوری، انتظار می‌رود که کاربردهای GeoAI در حوزه‌های مختلف گسترش یافته و با فناوری‌های دیگری مانند اینترنت اشیا، بلاکچین^{۱۹} و واقعیت مجازی ادغام شود. در کل، تلفیق GIS و هوش مصنوعی یک تحول بزرگ در حوزه تحلیل داده‌های مکانی ایجاد کرده است و انتظار می‌رود در آینده نقش مهمی در حل چالش‌های جهانی ایفا کند (جی ژانگ و دیگران، ۲۰۲۴) (رانه و دیگران، ۲۰۲۳).

مبانی نظری

کاربردهای GeoAI در مدیریت شهری، در پنج گروه کاربرد در تفسیر تصاویر ماهواره‌ای، مدیریت منابع و کاربری، پایش آلودگی و ارزیابی زیست‌محیطی، مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده و تحلیل شبکه‌های حمل و نقل دسته‌بندی شده است. شکل ۳ طبقه‌بندی کاربردهای GeoAI در مدیریت و برنامه‌ریزی شهری را نشان می‌دهد.

¹⁶ artificial neural networks

¹⁷ Reinforcement Learning

¹⁸ computer vision

¹⁹ blockchain

¹² Open source

¹³ Dartmouth

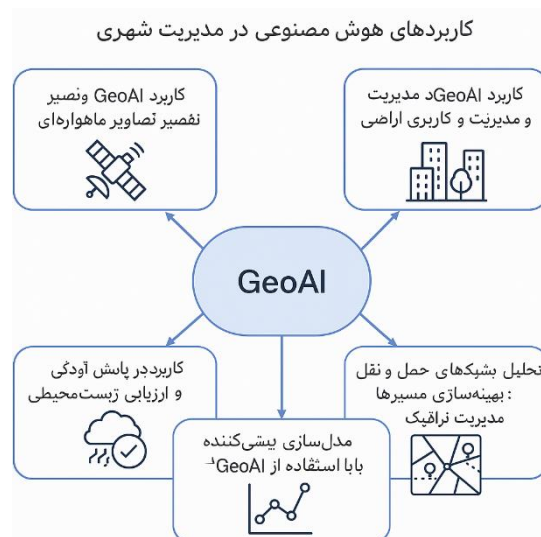
¹⁴ Machine Learning

¹⁵ Deep Learning

قادرند پیکسل‌های مربوط به زیرساخت‌ها را از پس‌زمینه جدا کرده و نقشه‌های دقیقی از آنها ارائه دهند مدل‌های یادگیری عمیق با استفاده از مجموعه داده‌های برچسب‌خورده آموزش می‌بینند. این داده‌ها شامل تصاویر ماهواره‌ای با برچسب‌های دقیق برای ساختمان‌ها، جاده‌ها و سایر زیرساخت‌ها هستند. سرانجام عملکرد مدل‌ها با معیارهایی مانند دقت، میانگین دقت متقابل و نرخ تشخیص صحیح ارزیابی می‌شود. این اطلاعات برای برنامه‌ریزی شهری، مدیریت بحران و ارزیابی توسعه شهری بسیار مفید است (ژانگ لی و دیگران، ۲۰۲۳).

• **شناسایی و تحلیل الگوی گسترش شهری:** پایش تغییرات کاربری زمین یکی از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی شهری است. این فرآیند شامل نظارت بر تغییرات در مناطق مسکونی، تجاری، صنعتی، کشاورزی و فضای سبز بر اساس داده‌های تصویری ماهواره‌ای است. در این فرایند، امکان تشخیص الگوها، طبقه‌بندی تصاویر، شناسایی تغییرات کاربری زمین، شناسایی افزایش مناطق شهری، کاهش اراضی کشاورزی، یا رشد مناطق صنعتی فراهم می‌گردد (دیپلاتو و دیگران، ۲۰۲۱). نتایج حاصل از استفاده GeoAI در برنامه‌ریزی شهری هوشمند، ارزیابی رشد شهرها، بررسی رشد مناطق مسکونی و صنعتی و طراحی بهینه زیرساخت‌ها، بررسی توسعه افقی و عمودی مناطق شهری، کنترل ساخت‌وساز غیرمجاز، مدیریت رشد حاشیه‌نشینی، شناسایی تغییرات غیرقانونی در کاربری زمین و جلوگیری از گسترش مناطق غیررسمی کاربرد دارد (آیدائو و دیگران، ۲۰۲۴).

۲- **کاربرد GeoAI در مدیریت منابع و کاربری اراضی شهری:** GeoAI در مدیریت منابع و کاربری اراضی شهری یکی از مهم‌ترین



شکل ۳. طبقه‌بندی کاربردهای GeoAI در مدیریت و برنامه‌ریزی شهری

۱- کاربرد GeoAI در تفسیر تصاویر ماهواره‌ای:

هوش مصنوعی (AI) با توانایی یادگیری و تحلیل داده‌های پیچیده، تحول شگرفی در زمینه تفسیر تصاویر ماهواره‌ای ایجاد کرده است. این فناوری به ما امکان می‌دهد تا با دقت و سرعت بسیار بالاتری، اطلاعات ارزشمندی را از این تصاویر استخراج کنیم (جی لی و دیگران، ۲۰۱۹). در ادامه به دو مورد از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در این زمینه می‌پردازیم:

• **شناسایی ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها:** هوش مصنوعی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌تواند با دقت بالایی ساختمان‌ها، جاده‌ها، پل‌ها و سایر زیرساخت‌ها را در تصاویر ماهواره‌ای شناسایی کند. برای این کار تصاویر ماهواره‌ای از منابع مختلف (نوری، مادون قرمز، راداری) جمع‌آوری و با تکنیک‌هایی مانند هم‌ترازی، حذف نویز و افزایش وضوح ترکیب می‌شوند. این مرحله برای بهبود کیفیت داده‌ها و تسهیل در شناسایی ویژگی‌های زیرساختی ضروری است. سپس الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای تقسیم‌بندی معنایی و نمونه‌ای استفاده می‌شوند. این مدل‌ها

دستاوردهای فناوری در حوزه برنامه‌ریزی و توسعه شهری به شمار می‌آید. GeoAI می‌تواند از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل سری‌های زمانی، تغییرات کاربری زمین را در طول زمان (مانند تبدیل زمین‌های کشاورزی به مسکونی یا صنعتی) شناسایی کند. این کار در برنامه‌ریزی کاربری بهینه زمین، کنترل توسعه بی‌رویه شهری و جلوگیری از تخریب محیط‌زیست اهمیت دارد. با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مبتنی بر GeoAI، می‌توان توسعه آینده‌ی مناطق شهری را بر اساس عوامل جغرافیایی، جمعیتی، اقتصادی و زیست‌محیطی پیش‌بینی کرد. این پیش‌بینی‌ها به مسئولان شهری در تخصیص منابع و مدیریت زیرساخت‌ها کمک می‌کند. GeoAI می‌تواند در تحلیل توزیع فضایی منابع (آب، فضای سبز، کاربری‌های خدماتی و ...) استفاده شود تا نابرابری‌ها شناسایی و اصلاح شوند. مثلاً در مناطقی که دسترسی کمتری به فضای سبز دارند، تصمیمات مناسبی برای توسعه پارک‌ها و فضاهای عمومی اتخاذ شود. همچنین در فرآیند تهیه طرح‌های تفصیلی و جامع شهری، GeoAI کمک می‌کند تا تصمیم‌گیری‌ها بر پایه داده‌های به‌روز، دقیق و تحلیلی صورت گیرد، نه صرفاً براساس مشاهده میدانی یا تجربه قبلی.

• مدیریت هوشمند کاربری اراضی شهری:

سیستم‌های توصیه‌گر شهری با بهره‌گیری از GeoAI، نقش مهمی در مدیریت هوشمند کاربری و تعیین بهینه‌ترین کاربری اراضی دارند (آلستا و شاقفا، ۲۰۲۲). این سیستم‌ها به تصمیم‌گیران شهری کمک می‌کنند تا با در نظر گرفتن معیارهای مختلف، بهینه‌ترین تصمیم را برای تغییر یا حفظ کاربری زمین اتخاذ کنند. این سیستم‌ها با گردآوری و پردازش داده‌های سنجش

از دور برای بررسی تغییرات کاربری اراضی، تحلیل داده‌ها GIS برای ارزیابی وضعیت فعلی زمین و پردازش داده‌های جمعیتی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای شناسایی نیازهای شهری و سپس تحلیل و یادگیری از داده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تغییرات آتی کاربری زمین و اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهترین کاربری ممکن را پیشنهاد می‌دهند. با مدیریت هوشمند کاربری اراضی شهری امکان پیشنهاد مناطق مناسب برای توسعه مسکونی، تجاری یا صنعتی بر اساس نیازهای آینده، شناسایی مناطق دارای پتانسیل برای بازآفرینی شهری، تعیین محدوده‌های حفاظت‌شده زیست‌محیطی و پیشنهادهای لازم برای کاهش تخریب محیط‌زیست، ایجاد سیستم‌های هشدار سریع برای جلوگیری از تغییرات غیرمجاز در کاربری اراضی، بهینه‌سازی مستمر برنامه‌های شهری، تنظیم سیاست‌های شهری هوشمند با تحلیل داده‌های به‌روز و تغییرات جدید در کاربری زمین و ایجاد مدیریت شهری پویا وجود دارد (ژو و کائو، ۲۰۲۲). سیستم‌های توصیه‌گر در مدیریت کاربری اراضی موجب بهبود کارایی برنامه‌ریزی شهری و تصمیم‌گیری هوشمند، کاهش هزینه‌های مدیریت شهری با تخصیص بهینه زمین، افزایش پایداری محیط‌زیست با جلوگیری از تخریب بی‌رویه اراضی، پیش‌بینی بهتر روندهای توسعه شهری و کنترل رشد نامنظم شهرها، و ارتقای کیفیت زندگی شهروندان با بهینه‌سازی توزیع فضاهای سبز و خدمات شهری می‌شود. این سیستم‌ها نه تنها به مدیران شهری در تصمیم‌گیری بهتر کمک می‌کنند، بلکه توسعه‌ای پایدار و متعادل را برای شهرها به ارمغان می‌آورند (هی، ۲۰۲۳).

• شهرهای هوشمند^{۲۰} و اینترنت اشیا^{۲۱}

(IoT): شهرهای هوشمند با بهره‌گیری از اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی، امکان جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده‌های مکانی در زمان واقعی را فراهم می‌کنند. این فناوری‌ها نقش مهمی در مدیریت شهری ایفا می‌کنند و به بهینه‌سازی تصمیمات شهری کمک می‌کنند (عالم و دانی، ۲۰۱۹). اینترنت اشیا شامل مجموعه‌ای از حسگرها، دوربین‌ها، پهپادها، و دستگاه‌های متصل به شبکه است که به‌طور مستمر اطلاعات مربوط به شهر را جمع‌آوری می‌کنند. برخی از منابع اصلی داده‌های مکانی عبارت‌اند از سنسورهای زمین‌شناسی و محیطی برای پایش تغییرات در کاربری اراضی، دوربین‌های هوشمند و پهپادها برای نظارت بر مناطق شهری و شناسایی تغییرات غیرمجاز، داده‌های GPS و سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند برای بررسی الگوهای تردد و نیازهای توسعه شهری، شبکه‌های هوشمند انرژی و آب برای ارزیابی تأثیر زیرساخت‌ها بر توسعه شهری که داده‌های آنی را برای مدیریت شهر هوشمند فراهم می‌کنند. با استفاده از هوش مصنوعی، داده‌های جمع‌آوری‌شده پردازش و تحلیل می‌شوند تا بهترین پیشنهادها را در مدیریت شهری ارائه نمایند. یکی از کاربردهای عملی در این زمینه کنترل توسعه شهری با استفاده از داده‌های آنی از ساخت‌وسازهای جدید و تغییرات زمین در جهت جلوگیری از گسترش بی‌رویه و ناموزون شهر است (ژو و دیگران، ۲۰۲۴). هرچند IoT در پایش محیط زیست و آلودگی‌ها، مدیریت حمل و نقل شهری نیز کاربرد دارد که بدان اشاره خواهد شد.

۳- کاربرد GeoAI در پایش آلودگی و ارزیابی زیست‌محیطی:

• کاربرد GeoAI در پایش آلودگی هوا: با بهره‌گیری از تحلیل داده‌های با هوش مصنوعی، پایش و ارزیابی آلودگی در مقیاس محلی، شهری را امکان‌پذیر می‌کند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سنسورهای IoT میزان آلاینده‌های جوی مانند CO₂، NO₂ و PM_{2.5} پایش شده و با به‌کارگیری GeoAI امکان شناسایی نقاط بحرانی و ارائه هشدارهای زودهنگام وجود دارد. همچنین می‌توان با استفاده از GeoAI تحلیل الگوهای ترافیکی را انجام داده و تأثیرات آن بر آلودگی هوا بررسی نمود (گریچ و دیگران، ۲۰۲۴).

• کاربرد GeoAI در پایش آلودگی آب: با سنجش میزان آلودگی مانند PH، نیتрат، فلزات سنگین در منابع آبی با استفاده از حسگرهای IoT، داده‌های ماهواره‌ای و پردازش تصویر و تشخیص نشت مواد شیمیایی و آلاینده‌ها، پیش‌بینی آلودگی آب با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و ردیابی مسیر گسترش آلودگی در شبکه‌های آبرسانی شهری امکان‌پذیر است. همچنین با مدل‌سازی مکانی می‌توان عوامل اصلی آلودگی را آنالیز نمود و به برنامه‌ریزان شهری برای کاهش آلودگی و مدیریت ریسک کمک کرد (لین و دیگران، ۲۰۱۸).
• کاربرد GeoAI در پایش آلودگی خاک: پایش آلودگی خاک و زمین با استفاده از GeoAI در مناطق شهری نقش مهمی در مدیریت آلودگی محیطی، حفظ سلامت شهروندان و توسعه پایدار شهری دارد. این فناوری به شناسایی منابع آلاینده، ارزیابی گسترش آلودگی و ارائه راهکارهای پیشگیرانه کمک می‌کند. تشخیص و ردیابی منابع

²¹ Internet of Things

²⁰ Smart Cities

حجم عظیمی از داده‌ها و کشف الگوهای پیچیده، تحولی شگرف در حوزه مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده ایجاد کرده است. این فناوری به ما امکان می‌دهد تا رویدادهای آینده را با دقت بیشتری پیش‌بینی کرده و برای مقابله با آن‌ها آماده شویم.

• شبیه‌سازی رشد شهری و تعیین مناطق

مستعد توسعه: با استفاده از GeoAI امکان شبیه‌سازی رشد شهری و تعیین مناطق مستعد توسعه یا بهسازی و پیش‌بینی و شبیه‌سازی توسعه شهری و مدل‌سازی تغییرات کاربری زمین بر اساس روندهای جمعیتی، اقتصادی و زیست‌محیطی و جلوگیری از گسترش نامتوازن شهر فراهم می‌گردد. GeoAI با تحلیل داده‌های تاریخی مکانی و ترکیب آنها با داده‌های محیطی، جمعیتی و اقتصادی، الگوهای رشد شهری را شناسایی کرده و روند توسعه شهری در آینده را پیش‌بینی می‌کند (چن و دیگران، ۲۰۲۳).

همچنین با به‌کارگیری سیستم‌های چندعاملی²² (MAS) امکان بررسی تعامل بین متغیرهای مختلف و در نظر گرفتن شاخص‌های پایداری شهری مانند دسترسی به حمل‌ونقل، خدمات عمومی، تراکم جمعیت و تأثیرات زیست‌محیطی در تصمیم‌گیری وجود دارد. ضمن آن که می‌توان مدل‌های پیش‌بینی مختلفی را برای ارزیابی سناریوهای مختلف توسعه شهری ارائه نمود و در هر سناریو تحلیل تأثیر توسعه شهری بر محیط‌زیست و منابع طبیعی را انجام داد (باتی و دیگران، ۲۰۲۲). برای مثال در هر سناریوی توسعه شهری و با افزایش تراکم شهری GeoAI می‌تواند نقشه‌های آلودگی هوا را تهیه کرده و مناطق پرخطر را شناسایی کند، می‌تواند تأثیر توسعه شهری بر

آلودگی شهری، تشخیص مکان‌های آلوده اطراف کارخانه‌ها، محل‌های دفن زباله، یا پمپ‌بنزین‌ها با GeoAI، پایش آلودگی فلزات سنگین در خاک، ارزیابی سطح آلودگی ناشی از فلزات سنگین مانند سرب، جیوه و کادمیوم که از ترافیک، ساخت‌وساز و صنایع شهری ناشی می‌شود، مدیریت آلودگی خاک در پروژه‌های ساخت‌وساز شهری، بررسی و تحلیل کیفیت خاک پیش از اجرای پروژه‌های عمرانی و ساختمانی، پیشگیری از گسترش آلودگی در محل‌های ساخت‌وساز با تحلیل مکانی آنی از جمله کاربردهای GeoAI در این زمینه است (سی ژانگ و دیگران، ۲۰۲۳).

• کاربرد GeoAI در ارزیابی محیط‌زیست:

استفاده از GeoAI امکان تحلیل فضای سبز شهری و پوشش گیاهی، ارزیابی سلامت و تغییرات پوشش گیاهی، شناسایی کمبود فضای سبز در مناطق مختلف شهری و ارائه راهکارهای بهبود، پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی بر پوشش گیاهی شهری. شناسایی و تحلیل اثر جزیره حرارتی شهری و ارائه راهکارهایی برای کاهش اثرات گرمایی از طریق طراحی شهری مناسب و افزایش فضای سبز امکان‌پذیر است. استفاده از GeoAI در ارزیابی محیط‌زیست شهری موجب تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر و بهبود کیفیت زندگی و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، پیش‌بینی بهتر و جلوگیری از بحران‌های زیست‌محیطی پیش از وقوع، بهینه‌سازی منابع‌کاهش هزینه‌های پایش محیط‌زیست و مدیریت بهتر منابع شهری می‌گردد (وای ژانگ لیو و دیگران، ۲۰۲۳).

۴- مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده با استفاده از

GeoAI: هوش مصنوعی (AI) با توانایی پردازش

²² Multi Agents System

امکان می‌دهد تا سیستم‌های حمل و نقل را بهینه کرده، ترافیک را مدیریت کنیم و تجربه سفر را برای مسافران بهبود بخشیم. همچنین با بهینه‌سازی مسیرها و مدیریت هوشمند ترافیک، می‌توان زمان سفر را کاهش داد که منجر به کاهش ترافیک و در نتیجه کاهش آلودگی هوا و صدا می‌شود. با استفاده از سیستم‌های هوشمند ضمن کاهش هزینه‌های حمل و نقل، می‌توان خطر تصادفات را کاهش داد (یونس و دیگران، ۲۰۲۰).

سیستم‌های مسیریابی هوشمند: GeoAI

می‌تواند با تحلیل داده‌های ترافیک، شرایط جاده‌ها، و ترجیحات کاربران، بهترین مسیر را برای سفر پیشنهاد دهد. این سیستم‌ها به طور مداوم اطلاعات را به‌روزرسانی می‌کنند و با تحلیل زمانی-فضایی، امکان بررسی تغییرات ترافیکی در طول زمان و استفاده از داده‌های گذشته برای پیش‌بینی وضعیت آتی و پیشنهاد مسیرهای جایگزین، در صورت وجود ترافیک یا بسته شدن جاده‌ها و بهبود انتخاب مسیر را دارد. همچنین این سیستم‌ها امکان استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینی برای تخمین وضعیت ترافیک در زمان‌های آینده و شناسایی الگوهای ترافیکی را دارد (شن و دیگران، ۲۰۲۴).

بهینه‌سازی مسیرهای ناوگان: با پیاده‌سازی GeoAI، مدیران ناوگان می‌توانند مسیرها را به‌صورت پویا بهینه‌سازی کرده، اختلالات را پیش‌بینی کنند و کارایی عملیاتی را بهبود بخشند. این رویکرد مبتنی بر هوش مصنوعی نه تنها به بهینه‌سازی لجستیک و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند، بلکه در ایجاد شبکه‌های حمل‌ونقل پایدارتر و ایمن‌تر نیز نقش دارد. GeoAI به سازمان‌ها و شرکت‌ها کمک می‌کند تا هزینه‌های عملیاتی، زمان تحویل و مصرف سوخت را کاهش

منابع آبی سطحی و زیرزمینی را بررسی کند و امکان نشت آلاینده‌ها به منابع آبی را پیش‌بینی و راهکارهای کاهش آلودگی را ارائه دهد. در هر سناریوی توسعه شهری GeoAI امکان تحلیل تغییرات پوشش گیاهی و پیش‌بینی اثرات آن بر دمای شهری (جزیره حرارتی) و پیشنهاد مکان‌های مناسب برای توسعه فضای سبز را فراهم می‌کند. در صورتی که در سناریوی توسعه شهری، تغییرات کاربری زمین از جنگل‌ها و اراضی طبیعی به مناطق مسکونی وجود داشته باشد، GeoAI قابلیت مدل‌سازی و پیش‌بینی نحوه فرسایش خاک و تغییرات کاربری زمین و تاثیر آن بر سیلاب‌ها، فرونشست زمین و دمای شهری، تأثیر گسترش شهر بر زیستگاه‌های طبیعی و پیش‌بینی از دست رفتن زیستگاه‌های حیاتی و ارائه راهکارهای حفاظتی را دارد. ضمن آن که در هر سناریو توسعه شهری، امکان ارزیابی تأثیر پروژه‌های عمرانی و توسعه شهری، مدل‌سازی رشد جمعیت در مناطق توسعه یافته و تحلیل تقاضای خدمات مانند بهداشت، آموزش و حمل‌ونقل، پیش‌بینی نیازهای زیرساختی آینده، تحلیل الگوهای رشد اقتصادی و پیش‌بینی فرصت‌های سرمایه‌گذاری در مناطق توسعه یافته و پیش‌بینی تأثیر پروژه‌های جدید بر رفاه اجتماعی و اشتغال وجود دارد (لیو و بیلجکی، ۲۰۲۲).

۵- تحلیل شبکه‌های حمل و نقل: بهینه‌سازی

مسیرها، مدیریت ترافیک

GeoAI با توانایی پردازش حجم عظیمی از داده‌های ترافیکی بدست آمده از حسگرها، دوربین‌های نظارتی، دستگاه‌های GPS، داده‌های ماهواره‌ای و اینترنت اشیاء و کشف الگوهای پیچیده، تحول شگرفی در حوزه تحلیل شبکه‌های حمل و نقل ایجاد کرده است. این فناوری به ما

داده و بهره‌وری را افزایش دهند (کاسارانی، ۲۰۲۱).

مدیریت ترافیک: GeoAI انقلابی در مدیریت ترافیک ایجاد می‌کند با ترکیب هوش مصنوعی و تحلیل‌های مکانی بلادرنگ، شهرها می‌توانند جریان ترافیک را بهینه‌سازی کرده، ایمنی جاده‌ها را افزایش دهند و به آینده‌ای پایدارتر برای حمل‌ونقل شهری کمک کنند. با استفاده از داده‌های تاریخی GeoAI می‌تواند ترافیک را در آینده پیش‌بینی کند. این موضوع به برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند تا برای رویدادهای خاص یا تغییرات در الگوهای ترافیکی آماده شوند. همچنین GeoAI می‌تواند زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی را بهینه کرده و جریان ترافیک را روان‌تر کند. GeoAI می‌تواند با استفاده از دوربین‌های هوشمند و الگوریتم‌های تشخیص تصویر، رفتار رانندگان را تحلیل کرد و خطر تصادفات را کاهش دهد. ضمن آن که با استفاده از GeoAI امکان مدیریت هوشمند پارکینگ‌ها در جهت کمک به رانندگان برای یافتن راحت‌تر جای پارک وجود دارد (گونزالز و دیگران، ۲۰۲۳).

خودروهای خودران: GeoAI در حال ایجاد انقلابی در خودروهای خودران است و امکان درک بلادرنگ، تصمیم‌گیری هوشمندانه و ناوبری تطبیقی را فراهم می‌کند. با ترکیب نقشه‌برداری مبتنی بر هوش مصنوعی، ترکیب حسگرها و تحلیل‌های پیش‌بینی، وسایل نقلیه خودران می‌توانند با ایمنی و کارایی بیشتری حرکت کنند و راه را برای آینده‌ای هوشمندتر و پایدارتر در حمل‌ونقل هموار سازند. بر این اساس، خودروها می‌توانند با استفاده از سنسورها و الگوریتم‌های

هوش مصنوعی، محیط اطراف خود را درک کرده و تصمیمات رانندگی را اتخاذ کنند. فناوری‌های اصلی مورد استفاده در خودروهای خودران عبارتند از نقشه‌های با وضوح بالا (HD²³) همراه با به‌روزرسانی بلادرنگ، GPS، LiDAR²⁴ و بینایی کامپیوتری برای موقعیت‌یابی دقیق، تشخیص خطوط جاده و ساختارهای جاده‌ای با استفاده از هوش مصنوعی. در این فناوری با ترکیب داده‌های دوربین‌ها، LiDAR، رادار و حسگرهای مافوق صوت²⁵، امکان شناسایی اشیاء برای تشخیص عابران پیاده، وسایل نقلیه و موانع و تحلیل هوشمند صحنه برای ناوبری ایمن وجود دارد. بر اساس مدل‌های یادگیری ماشین پیش‌بینی حرکت وسایل نقلیه و عابران پیاده، انجام شده و با استفاده از GeoAI مسیرپایی بهینه و ایمن انجام می‌شود که امکان تغییر مسیر پویا بر اساس شرایط لحظه‌ای ترافیک و جاده نیز وجود دارد (سان و ارتیز، ۲۰۲۳).

مواد و روش‌ها

ابزارها و تکنولوژی‌ها: ابزارها و فناوری‌های کلیدی که در این حوزه GeoAI استفاده می‌شوند، شامل نرم‌افزارهایی که در زمینه GIS، کتابخانه‌های یادگیری ماشین، زبان‌های برنامه‌نویسی و پلتفرم‌های ابری است.

نرم‌افزارهای GIS

ArcGIS: یکی از محبوب‌ترین و جامع‌ترین نرم‌افزارهای GIS است که ابزارهای قدرتمندی برای جمع‌آوری، مدیریت، تحلیل و نمایش داده‌های مکانی ارائه می‌دهد. ArcGIS با ادغام با ابزارهای یادگیری ماشین، امکان ایجاد مدل‌های پیش‌بینی پیچیده و تحلیل‌های فضایی پیشرفته را فراهم می‌کند (ازری، ۲۰۲۵).

²⁵ Ultrasonic

²³ High Definition

²⁴ Light Detection and Ranging

ArcGIS Pro: این نسخه جدیدتر و پیشرفته‌تر است از ArcGIS است که از معماری ۶۴ بیتی پشتیبانی می‌کند. این به آن معنی است که ArcGIS Pro قادر به پردازش حجم بیشتری از داده‌ها با سرعت بالاتر و به‌صورت بهینه‌تری است. رابط کاربری مدرن و مبتنی بر نوار ابزار تبار^{۲۶} به کاربران امکان می‌دهد تا به‌طور راحتی به ابزارهای مختلف دسترسی داشته باشند و کارهای پیچیده‌تری را به‌صورت سریع‌تر انجام دهند. این نرم‌افزار برای مدیریت داده‌های سه‌بعدی، از جمله مدل‌های سطح زمین و شبیه‌سازی‌های شهری، به‌طور کامل بهینه‌شده است. همچنین امکان مدیریت و ویرایش داده‌ها در محیط سه‌بعدی را به راحتی فراهم می‌آورد. ضمن آن که توانایی پردازش داده‌های بزرگ و تحلیل‌های پیچیده را با استفاده از پردازش چند هسته‌ای و پردازش موازی دارد که باعث می‌شود انجام تحلیل‌ها در آن سریع‌تر باشد. ArcGIS Pro به‌طور خودکار به ArcGIS Online و دیگر منابع آنلاین متصل می‌شود و این امکان را به کاربران می‌دهد تا داده‌های جغرافیایی را به‌صورت آنلاین و به‌روز نگه دارند و نقشه‌ها و مدل‌ها را با دیگر کاربران به اشتراک بگذارید. ضمن آن که از اتوماسیون پیشرفته‌تری از جمله Python3 پشتیبانی می‌کند و بسیاری از ابزارهای جدیدتر و قدرتمندتری را برای اتوماسیون فراهم می‌آورد (ازری، ۲۰۲۵).

SagaGIS: یک نرم‌افزار منبع باز و رایگان است که قابلیت‌های گسترده‌ای در پردازش داده‌های مکانی و فضایی دارد. یکی از ویژگی‌های برجسته SagaGIS پشتیبانی قوی از داده‌های رستری است. این نرم‌افزار ابزارهای پیشرفته‌ای برای تحلیل

داده‌های رستری ارائه می‌دهد. همچنین قادر به انجام مدل‌سازی‌های مختلف از جمله تحلیل مناسبت‌سنجی زیست‌محیطی، مدل‌سازی انتشار آلودگی، و مدل‌سازی تغییرات اقلیمی است. sagaGIS امکان انجام تحلیل‌های سه‌بعدی را با استفاده از داده‌های DEM فراهم می‌کند. از این ویژگی برای مدل‌سازی سطح زمین، تحلیل شیب، جهت‌گیری و دید در محیط‌های سه‌بعدی استفاده می‌شود. SagaGIS ابزارهای پیشرفته‌ای برای تحلیل‌های آماری ارائه می‌دهد که می‌توان از آن‌ها برای تحلیل داده‌های مکانی و فضایی استفاده کرد. تحلیل خوشه‌ای^{۲۷} برای شبیه‌سازی گروه‌های مختلف از داده‌ها، تحلیل همبستگی^{۲۸} برای یافتن ارتباط بین ویژگی‌های مختلف داده‌ها، مدل‌سازی پیش‌بینی برای پیش‌بینی روندهای آینده و شبیه‌سازی تغییرات از جمله قابلیت‌های sagaGIS است. ضمن آن که این نرم‌افزار قابلیت کار با داده‌های زمانی را نیز دارد و می‌تواند روندهای زمانی و تغییرات در طول زمان را تحلیل کند. sagaGIS از زبان برنامه‌نویسی Python برای خودکارسازی تحلیل‌ها و پردازش‌های پیچیده پشتیبانی می‌کند. این به کاربران این امکان را می‌دهد که به راحتی مدل‌ها و تحلیل‌های خود را به صورت خودکار اجرا کنند (منابع آموزشی sagaGIS، ۲۰۱۷).

QGIS: یک نرم‌افزار منبع باز و رایگان است که به عنوان جایگزینی قدرتمند برای ArcGIS شناخته می‌شود. QGIS نیز قابلیت‌های گسترده‌ای برای تحلیل داده‌های مکانی و ادغام با ابزارهای یادگیری ماشین دارد (رمدانی، ۲۰۲۳).

کتابخانه‌های یادگیری ماشین

²⁸ Regression Analysis

²⁶ Ribbon
²⁷ Clustering Analysis

TensorFlow: یکی از قوی‌ترین کتابخانه‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق از گوگل است که برای ساخت و آموزش مدل‌های AI استفاده می‌شود. این کتابخانه از GPU و TPU پشتیبانی می‌کند، برای پروژه‌های مقیاس بزرگ مناسب است. DeepForest یک کتابخانه متن‌باز مبتنی بر TensorFlow هست که هدف آن تشخیص درختان از تصاویر هوایی و LiDAR با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق مثل RetinaNet هست (آبادی و دیگران، ۲۰۱۶).

PyTorch: یک کتابخانه بسیار محبوب برای یادگیری عمیق در زبان Python است که توسط شرکت Meta (فیسبوک) توسعه داده شده. این کتابخانه انعطاف‌پذیر، سریع، دارای پشتیبانی از GPU و محبوب در جامعه تحقیقاتی است. TorchGeo²⁹ نیز یک افزونه کتابخانه مبتنی بر PyTorch هست که مخصوص داده‌های مکانی و ماهواره‌ای طراحی شده است. این افزونه دارای امکان آماده‌سازی داده‌های رستری، پشتیبانی از فایل‌های مکانی با فرمت مختلف، سازگاری کامل با مدل‌های PyTorch، امکان تکه‌تکه کردن تصاویر^{۳۰} و بارگذاری هوشمند و کار با برچسب^{۳۱}‌های مکانی (مانند نقشه‌های کاربری اراضی) است (پاسزک و دیگران، ۲۰۱۹).

Scikit-learn: کتابخانه‌ای پرکاربرد در پایتون برای یادگیری ماشین است. الگوریتم‌های طبقه‌بندی، رگرسیون، خوشه‌بندی، انتخاب ویژگی، پیش‌پردازش داده‌ها و مدل‌سازی از قابلیت‌های اصلی این کتابخانه است. GeoPandas نسخه‌ی جغرافیایی Pandas برای

کار با داده‌های مکانی است. کار با نقاط، خطوط و چندضلعی‌ها، نگهداری مختصات در ستون، خواندن فایل‌های مکانی، انجام عملیات فضایی (مثل: اشتراک، فاصله، هم‌پوشانی) از قابلیت‌های اصلی آن است. از آنجا که Scikit-learn روی داده‌های عددی کار می‌کند، برای استفاده از GeoPandas باید ابتدا ویژگی‌های عددی از داده‌های مکانی را استخراج کرد، سپس آن را به DataFrame تبدیل کرد. عددی تبدیل کرد. (در واقع GeoPandas یک Pandas DataFrame با یک ستون Geometry است.) و سرانجام می‌توان از مدل‌های Scikit-learn استفاده کرد. (جوردال و دیگران، ۲۰۲۰).

PySAL^{۳۲}: کتابخانه‌ای پایتونی برای تحلیل مکانی و فضایی کاربردش مثل Scikit-learn برای یادگیری ماشین، ولی مختص به آنالیز مکانی است. از قابلیت‌های آن می‌توان به تحلیل خودهمبستگی^{۳۳} فضایی، وزن‌های مکانی، خوشه‌بندی فضایی و رگرسیون مکانی اشاره نمود (ری و دیگران، ۲۰۱۵).

زبان‌های برنامه‌نویسی

Python: پایتون زبان ساده و محبوب در بین دانشمندان داده، محققان و مهندسان GIS است که کتابخانه‌های بسیار قوی برای هر دو حوزه تحلیل فضایی و یادگیری ماشین و هوش مصنوعی دارد. برخی از کتابخانه‌های داده‌های مکانی شامل GeoPandas برای کار با فایل‌های shapefile، GeoJSON و تحلیل برداری، Shapely برای هندسه و تحلیل فضایی روی نقاط و چندضلعی‌ها، rasterio برای خواندن تصاویر ماهواره‌ای

³² Python Spatial Analysis Library

³³ Spatial Autocorrelation

²⁹ Torch Geospatial

³⁰ tiling

³¹ label

terra نسخه به‌روزشده و سریع‌تر برای داده‌های رستری، rgdal و rgeos برای عملیات هندسی و تغییر سیستم مختصات، tmap، leaflet و ggplot2 برای نقشه‌کشی تعاملی و گرافیکی است.

کتابخانه‌های آمار فضایی و مدل‌سازی مکانی R نیز شامل spdep برای تحلیل خودهمبستگی فضایی (Moran's I, LISA)، gstat برای مدل‌های کریجینگ، تحلیل واریوگرام، spatialreg برای مدل‌های رگرسیون فضایی (SLM, SEM)، GWmodel برای رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) و spTimer برای مدل‌سازی زمان-فضا^{۳۸} است.

ضمن اینکه از کتابخانه‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی caret بعنوان چارچوب یکپارچه برای یادگیری ماشین، xgboost برای مدل‌های ML پیشرفته، mlr3 برای نسل جدید پلتفرم ML در R، keras و tensorflow برای یادگیری عمیق با اتصال به نسخه پایتون و h2o برای یادگیری ماشین در مقیاس بزرگ با رابط گرافیکی عالی استفاده می‌کند (هیجمنس، ۲۰۲۵). JavaScript: زبان استاندارد وب است که تقریباً همه مرورگرها از آن پشتیبانی می‌کنند. این زبان در بطن GEE^{۳۹} بعنوان زبان پیش فرض برای تحلیل ماهواره‌ای قرار دارد. ابزارهای نقشه‌کشی تعاملی قوی مثل Mapbox، Leaflet و Cesium دارد و از آن می‌توان برای ساخت داشبوردهای مکانی، ویژوال‌سازی و مدل‌های AI سمت‌کلاینت استفاده کرد. حوزه‌های اصلی استفاده از JavaScript در GeoAI شامل

(GeoTIFF)، Pyproj برای کار با سیستم مختصات (CRS)، Folium برای کار با نقشه‌های تعاملی در Jupyter Notebook و geemap برای اتصال به Google Earth Engine از پایتون است.

برخی از کتابخانه‌های یادگیری ماشین و AI پایتون نیز شامل scikit-learn برای اجرای الگوریتم‌های سنتی ML مانند نزدیک‌ترین k همسایه^{۳۴}، ماشین بردار پشتیبان^{۳۵}، جنگل تصادفی^{۳۶} و گرادیان بوستینگ تقویتی^{۳۷} برای یادگیری پیش‌رفته در داده‌های tabular، TensorFlow و PyTorch برای یادگیری عمیق، مخصوصاً روی تصاویر، OpenCV برای بینایی ماشین، پردازش تصویر است.

کتابخانه‌های مدل‌سازی مکانی و آماری پیشرفته پایتون نیز شامل PySAL برای محاسبه خودهمبستگی فضایی، مدل‌های رگرسیونی فضایی، mgwr برای مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی، Segregation برای اندازه‌گیری تبعیض فضایی (نژادی، اقتصادی و...) است (اسمیت و دوئه، ۲۰۲۳).

زبان R: زبان R یکی از قدرتمندترین و تخصصی‌ترین زبان‌ها برای تحلیل داده‌های مکانی و مدل‌سازی آماری با استفاده از هوش مصنوعی، به‌ویژه در حوزه‌های آکادمیک، محیط زیست، اپیدمیولوژی، و علوم اجتماعی است. کتابخانه‌های داده مکانی R شامل sf بعنوان ساختاری مدرن برای داده‌های برداری (جایگزین sp)، raster برای کار با داده‌های رستری (ماهواره‌ای، ارتفاع، دما...)،

^{۳۷} eXtreme Gradient Boosting (XGBoost)

^{۳۸} spatio-temporal

^{۳۹} Google Earth Engine

^{۳۴} K-Nearest Neighbors (KNN)

^{۳۵} Support Vector Machine (SVM)

^{۳۶} Random Forest (RF)

ماشین شامل مدل‌های مولد است. با ادغام Earth Engine و Vertex AI می‌توان مدل‌های پیش‌بینی مکانی را روی داده‌های ماهواره‌ای آموزش و به‌سرعت استقرار داد. Google Maps Platform و Imagery Insights افزونه‌هایی برای دسترسی به داده‌های مکان‌یابی، مسیریابی و تحلیل زیرساخت‌هاست که از طریق BigQuery Roads قابل پرس‌وجو هستند. این افزونه‌ها شامل Places Management Insights است. ترکیب این خدمات در GCP امکان ساخت، تست و مقیاس‌دهی سریع راهکارهای GeoAI را بدون مدیریت زیرساخت پیچیده فراهم می‌کند (یانگ و دیگران، ۲۰۲۲).

AWS⁴²: پلتفرم ابری آمازون است که ابزارهای متعددی برای پیاده‌سازی راهکارهای GeoAI در اختیار قرار داده و از مرحله داده‌کاوی تا استقرار مدل را پوشش می‌دهند. Amazon SageMaker Geospatial مجموعه‌ای از قابلیت‌های آماده برای پردازش داده‌های مکانی فراهم می‌کند. دسترسی به منابع باز و تجاری داده (تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های برداری)، پیش‌پردازش خودکار (تحویل داده‌ها، تبدیل فرمت‌ها)، آموزش و استقرار مدل‌های یادگیری ماشین بر بستر مدیریت‌شده SageMaker، مصورسازی نتایج روی نقشه‌های سه‌بعدی از جمله این امکانات است. این سرویس مخصوصاً برای تحلیل تأثیر بلنددنگ رویدادهای محیطی و ارزیابی ریسک به‌کار می‌آید. Amazon Location Service سرویس جامع موقعیت‌یابی را به توسعه‌دهندگان قابلیت‌هایی مانند نمایش نقشه، جستجوی مکان، مسیریابی، ردیابی دستگاه و ایجاد مناطق

تحلیل داده‌های مکانی با GEE⁴⁰ به واسطه دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای عظیم مثل Landsat، MODIS، Sentinel است. JavaScript با کتابخانه‌هایی همانند Leaflet.js که بسیار سبک، سریع، رایگان است، Mapbox GL JS که برای رندر نقشه‌برداری و تصویری با WebGL است و CesiumJS که برای نقشه سه‌بعدی و مدل‌های زمین و شهر است، قدرتی فوق‌العاده در نقشه‌های تعاملی و WebGIS دارد.

با استفاده از JavaScript امکان اجرای مدل‌های یادگیری عمیق در سمت مرورگر، امکان اجرای مدل‌های آموزش‌دیده با PyTorch یا-scikit-learn و نیز ایجاد رابط ساده‌تر برای مدل‌های آماده (سازگار با مبتدی‌ها) وجود دارد (گاندی، ۲۰۲۳).

پلتفرم‌های ابری

GCP⁴¹: به‌عنوان بستری کامل برای GeoAI از ابزارها و سرویس‌های تخصصی زیر تشکیل شده است. Google Earth Engine که پلتفرمی برای تحلیل مقیاس‌پذیر تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های برداری است و از طریق BigQuery نیز قابل فراخوانی است. کاتالوگ بیش از ۹۰ پتابایت داده شامل تصاویر Sentinel و Landsat را در اختیار قرار می‌دهد و API های Python و JavaScript آن امکان خودکارسازی فرایندهای مکانی را میسر می‌کند. BigQuery GIS انبار داده کاملاً مدیریت‌شده با انواع داده مکانی و توابع GoogleSQL برای انجام تحلیل‌های فضایی است. Vertex AI پلتفرمی یکپارچه برای ساخت، آموزش و استقرار مدل‌های یادگیری

⁴² Amazon Web Services

⁴⁰ Google Earth Engine

⁴¹ Google Cloud Platform

این ماشین مجازی امکان پردازش داده‌های رستری، برداری و زمانی را با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق فراهم می‌سازد. Azure Data Explorer نیز با افزودن توابع جدید، قابلیت‌های تحلیل‌های مکانی را گسترش داده است. این توابع امکان انجام عملیات پیچیده‌ای مانند محاسبه زاویه بین خطوط یا ایجاد بافرهای مکانی را فراهم می‌کنند. در مجموع، Azure با ارائه زیرساخت مقیاس‌پذیر، ابزارهای پیشرفته تحلیل داده و یکپارچگی با سرویس‌های مختلف، بستری قدرتمند برای توسعه راهکارهای GeoAI فراهم می‌کند. این پلتفرم به کاربران امکان می‌دهد تا از داده‌های مکانی برای تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه‌تر و بهینه‌سازی فرآیندها بهره‌برداری کنند (یوئه و دیگران، ۲۰۱۳).

مراحل ایجاد GeoAI:

۱- جمع‌آوری داده‌های مکانی: اولین مرحله برای ایجاد GeoAI، جمع‌آوری داده‌های مکانی است. این داده‌ها می‌توانند از منابع مختلفی استخراج شوند؛ مانند تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های GPS، حسگرهای هوشمند، داده‌های سنجش از دور، نقشه‌های دیجیتال و اطلاعات مکانی مختلف. داده‌های مکانی شامل ویژگی‌هایی چون ارتفاع، دما، رطوبت، پوشش گیاهی، کاربری زمین و داده‌های مربوط به ترافیک و حمل‌ونقل می‌شوند. این داده‌ها برای تحلیل‌های مکانی باید به‌طور دقیق جمع‌آوری شوند. در بسیاری از موارد، داده‌ها از منابع مختلف با ویژگی‌های متفاوت جمع‌آوری می‌شوند که نیاز به هماهنگ‌سازی و یکپارچگی دارند. برای استفاده در GeoAI، علاوه بر داده‌های مکانی، داده‌های غیرمکانی نیز ممکن است لازم باشند، مانند

جغرافیایی را می‌دهد. Amazon Location Service نه‌تنها با سایر سرویس‌های AWS یکپارچه است، بلکه امنیت و کنترل کامل روی داده‌های مکانی را نیز تضمین می‌کند. AWS Ground Station برای پروژه‌های مبتنی بر تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای، AWS Ground Station امکان دانلود بلادرنگ داده‌ها از ماهواره، پردازش آن‌ها با سرویس‌هایی مانند EC2 و S3 و سپس تحلیل با ابزارهای ML را فراهم می‌کند. این سرویس بدون نیاز به زیرساخت فیزیکی ایستگاه زمینی، هزینه‌ها و پیچیدگی را به حداقل می‌رساند. در مجموع، AWS با ارائه پلتفرمی یکپارچه و انعطاف‌پذیر، توسعه‌ی سریع و مقیاس‌دهی آسان راهکارهای GeoAI را ممکن می‌سازد (سوما، ۲۰۲۴).

Microsoft Azure: به‌عنوان یک پلتفرم ابری پیشرفته، ابزارها و سرویس‌های متنوعی را برای توسعه و استقرار راهکارهای GeoAI ارائه می‌دهد. این پلتفرم با ترکیب قابلیت‌های یادگیری ماشین، تحلیل‌های مکانی و مصورسازی پیشرفته، امکان تحلیل داده‌های جغرافیایی را در مقیاس وسیع فراهم می‌کند. Azure Maps یکی از سرویس‌های کلیدی در این حوزه است که امکاناتی مانند مکان‌یابی، مسیریابی، ژئوفنسینگ و مصورسازی داده‌های مکانی را ارائه می‌دهد. این سرویس با پشتیبانی از نقشه‌های تعاملی، لایه‌های سفارشی و قابلیت‌های سه‌بعدی، ابزار قدرتمندی برای تحلیل‌های مکانی فراهم می‌کند. ⁴³DSVM حاصل همکاری Microsoft و Esri است که با نصب پیش‌فرض ArcGIS Pro و ابزارهای یادگیری ماشین، محیطی آماده برای تحلیل‌های مکانی و توسعه مدل‌های پیش‌بینی فراهم می‌کند.

⁴³ GeoAI Data Science Virtual Machine

گزینه‌ها هستند، زیرا این مدل‌ها قادرند ویژگی‌های مکانی و زمانی تصاویر را به‌خوبی شبیه‌سازی کنند. برای مسائل پیش‌بینی و تحلیل زمان‌بندی، ممکن است مدل‌های سری زمانی یا یادگیری تقویتی مناسب‌تر باشند. در انتخاب مدل، باید دقت شود که پیچیدگی مدل با منابع موجود (مانند پردازشگرها و حافظه) و داده‌ها هماهنگ باشد. انتخاب مدل مناسب در کیفیت نهایی پروژه تأثیر زیادی دارد.

۴- **آموزش و ارزیابی مدل‌ها:** مدل‌های یادگیری ماشین در این مرحله با استفاده از داده‌های آموزشی آموزش داده می‌شوند. داده‌های آموزشی شامل نمونه‌هایی از ویژگی‌ها و برچسب‌ها هستند که به مدل این امکان را می‌دهند که الگوها و روابط میان داده‌ها را یاد بگیرد. به‌عنوان مثال، در پروژه‌ای که هدف آن تشخیص کاربری زمین از تصاویر ماهواره‌ای است، مدل باید از داده‌هایی که مشخص کرده‌اند هر ناحیه به چه نوع کاربری تعلق دارد (مثل کشاورزی، شهری، جنگلی و...) استفاده کند. پس از آموزش مدل، باید عملکرد آن ارزیابی شود. این ارزیابی معمولاً با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشی انجام می‌شود که برای آموزش مدل استفاده نشده‌اند. برای سنجش کارایی مدل، معیارهایی مانند دقت^{۴۴}، دقت مثبت^{۴۵} و یادآوری^{۴۶} به کار می‌روند. در کاربردهای مکانی، علاوه بر این معیارها، دقت مکانی نیز ارزیابی می‌شود، مثلاً اینکه چقدر مدل توانسته است موقعیت دقیق ویژگی‌های جغرافیایی را شبیه‌سازی کند.

۵- **پیاده‌سازی و کاربرد:** پس از اطمینان از دقت و کارایی مدل‌های یادگیری ماشین، مرحله‌ی

اطلاعات جمعیتی، اقتصادی و اجتماعی، که در تحلیل‌های جغرافیایی به کار می‌روند. این داده‌ها می‌توانند به‌صورت ترکیبی مدل‌های دقیق‌تری را برای تحلیل و پیش‌بینی فراهم کنند.

۲- **پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها:** یکی از مهم‌ترین مراحل در ایجاد یک مدل موفق GeoAI، آماده‌سازی داده‌ها است. داده‌های مکانی معمولاً بسیار متنوع و پیچیده هستند و برای استفاده در مدل‌های یادگیری ماشین باید به‌طور دقیق پردازش شوند. در این مرحله، داده‌ها ممکن است نیاز به پاک‌سازی، تصحیح و یکپارچه‌سازی داشته باشند. داده‌های مکانی ممکن است حاوی نویز، داده‌های گمشده یا مقادیر اشتباه باشند که باید اصلاح شوند. همچنین، سیستم‌های مختصاتی مختلف باید به یک سیستم مرجع واحد تبدیل شوند تا مدل قادر باشد آن‌ها را به‌طور صحیح تحلیل کند. در این مرحله، داده‌ها معمولاً به فرمت‌هایی تبدیل می‌شوند که برای مدل‌های یادگیری ماشین قابل استفاده باشند. این فرایند شامل تبدیل داده‌های مکانی به ویژگی‌های عددی، انجام نرمال‌سازی و همچنین فیلتر کردن داده‌ها برای کاهش نویز است.

۳- **طراحی و انتخاب مدل‌های یادگیری ماشین:** در این مرحله، بسته به نوع مسئله و نیاز خاص پروژه، انتخاب الگوریتم‌های یادگیری ماشین یا یادگیری عمیق انجام می‌شود. الگوریتم‌ها می‌توانند شامل مدل‌های پایه‌ای مانند درخت تصمیم، ماشین بردار پشتیبان (SVM) یا مدل‌های پیچیده‌تری مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) باشند. برای مسائل تصویری، شبکه‌های عصبی کانولوشنی یکی از بهترین

⁴⁶ Recall

⁴⁴ Accuracy

⁴⁵ Precision

پیاده‌سازی آن‌ها در پروژه‌های واقعی آغاز می‌شود. این مرحله شامل استفاده از مدل‌های آموزش‌دیده برای حل مسائل دنیای واقعی است. به‌طور خاص، مدل‌های GeoAI می‌توانند در حوزه‌های مختلفی مانند مدیریت بحران شهری، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، برنامه‌ریزی شهری، پایش محیط‌زیست، تحلیل بازارهای مکانی و حتی سیستم‌های حمل‌ونقل خودران به‌کار گرفته شوند. در این مرحله، نتایج مدل‌ها به‌طور معمول به‌صورت نقشه‌ها، گزارش‌ها و نمودارهایی به تصمیم‌گیرندگان ارائه می‌شود تا بتوانند بر اساس آن‌ها تصمیمات مؤثر و دقیق‌تری اتخاذ کنند. به‌عنوان مثال، در مدیریت بحران، GeoAI می‌تواند به شبیه‌سازی و پیش‌بینی مسیر حرکت سیلاب‌ها یا زلزله‌ها کمک کند و در نتیجه برنامه‌ریزی‌های لازم برای تخلیه و جلوگیری از خسارات بیشتر انجام شود (پیردیکا و پائواتی، ۲۰۲۲) (لی و آراندل، ۲۰۲۲).

چالش‌های استفاده از GeoAI

GeoAI با ترکیب داده‌های مکانی و هوش مصنوعی، رویکردی نوین و کارآمد در مدیریت و برنامه‌ریزی شهری ارائه می‌دهد. این فناوری با ادغام داده‌های سنسورها، ماهواره‌ها، سیستم‌های GPS، شبکه‌های حمل‌ونقل و اطلاعات شهری، راهکارهایی نوآورانه برای مدیریت منابع، بهبود کیفیت زندگی و ایجاد شهرهای هوشمند ارائه می‌دهد. همچنین با تحلیل داده‌های بلادرنگ، پیش‌بینی روندها، بهینه‌سازی زیرساخت‌های شهری و بهبود خدمات عمومی، تأثیر قابل توجهی در توسعه شهرهای هوشمند دارد. اگرچه GeoAI پتانسیل‌های بسیار بالایی دارد، اما با چالش‌ها و

محدودیت‌هایی نیز همراه است. درک این چالش‌ها برای استفاده مؤثر از این فناوری‌ها بسیار مهم است. • یکی از این چالش‌ها، دقت و کیفیت داده‌های مکانی و غیرمکانی است تأثیر مستقیمی بر دقت مدل‌های هوش مصنوعی دارد. داده‌های ناقص، نادرست یا قدیمی می‌توانند به نتایج نادرست منجر شوند. ضمن اینکه تلفیق داده‌ها از منابع مختلف با فرمت‌های متفاوت نیز می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. از طرفی دیگر داده‌های مکانی به‌طور مداوم در حال تغییر هستند. به‌روز نگه داشتن داده‌ها برای اطمینان از دقت مدل‌ها ضروری است. لذا باید نسبت به جمع‌آوری، رفع خطاها^{۴۷} و اعتبارسنجی داده‌ها قبل از استفاده در مدل‌های هوش مصنوعی اهتمام ورزید.

• چالش دیگر هزینه محاسبات و پردازش حجم بالای داده‌ها است. مدل‌های هوش مصنوعی به ویژه مدل‌های یادگیری عمیق، نیازمند پردازش حجم عظیمی از داده‌ها هستند که ممکن است به زیرساخت‌های محاسباتی قدرتمندی نیاز داشته باشد. سخت‌افزارهای مورد نیاز برای آموزش و اجرای مدل‌های پیچیده هوش مصنوعی می‌تواند بسیار گران باشد. نرم‌افزارهای تخصصی GIS و هوش مصنوعی نیز هزینه‌های قابل توجهی دارند. برای کاهش هزینه‌ها می‌تواند از ابزارهای متن‌باز^{۴۸} و رایگان و ابرشمارش^{۴۹} برای دسترسی به منابع محاسباتی قدرتمند، استفاده کرد.

• چالش بعدی موضوع حریم خصوصی داده‌ها است. بسیاری از داده‌های مکانی حاوی اطلاعات شخصی هستند که حریم خصوصی افراد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. استفاده از داده‌های شخصی برای اهداف تجاری یا تحقیقاتی نیازمند رعایت

⁴⁹ supercomputing

⁴⁷ Clean Up

⁴⁸ Open Source

که با مشارکت در توسعه استانداردهای جهانی برای داده‌های مکانی و مدل‌های هوش مصنوعی این موضوع نیز مرتفع خواهد شد.

با توجه به اهمیت روزافزون داده‌های مکانی و هوش مصنوعی، رفع این چالش‌ها و استفاده مؤثر از این فناوری‌ها برای حل مسائل پیچیده و ایجاد آینده‌ای بهتر ضروری است.

نتیجه‌گیری

تلفیق GIS و هوش مصنوعی، تحولی شگرف در حوزه تحلیل داده‌های مکانی و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده ایجاد کرده است. با توجه به پیشرفت‌های سریع در هر دو حوزه، آینده این ترکیب بسیار امیدوارکننده است. با استفاده از GeoAI می‌توان پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از رویدادها، ترافیک و سایر پدیده‌های مکانی انجام دهد. ضمن آن که می‌تواند به تصمیم‌گیران کمک کند تا تصمیمات بهتری اتخاذ کنند و منابع را بهینه کنند. با استفاده از GeoAI می‌توان خدمات مکانی شخصی‌سازی شده‌ای را برای کاربران ارائه کرد. در ضمن می‌تواند به کشف الگوها و روابط پنهان در داده‌های مکانی کمک کند. GeoAI به طور قابل توجهی بر بازار کار تأثیر خواهد گذاشت. از یک سو، تقاضا برای متخصصانی که در زمینه GIS، هوش مصنوعی و علوم داده تخصص دارند افزایش خواهد یافت و فرصت‌های شغلی جدید در حوزه‌های مختلف مانند تحلیل داده، توسعه نرم‌افزار و مدیریت پروژه و... ایجاد می‌نماید، از سوی دیگر، برخی از مشاغل که به صورت دستی انجام می‌شدند ممکن است خودکار شوند. در کل، آینده تلفیق GIS و هوش مصنوعی بسیار امیدوارکننده است.

قوانین و مقررات مربوط به حریم خصوصی است. حفاظت از داده‌ها در برابر دسترسی‌های غیرمجاز و حملات سایبری ضروری است. رعایت قوانین و مقررات مربوط به حریم خصوصی و استفاده از روش‌های رمزنگاری برای محافظت از داده‌ها در این زمینه مفید خواهد بود.

- چالشی دیگر، بحث تفسیر نتایج است. مدل‌های یادگیری عمیق اغلب به عنوان جعبه سیاه شناخته می‌شوند، زیرا درک چگونگی رسیدن به نتایج خاص دشوار است. حتی ممکن است مدل‌های هوش مصنوعی حاوی تعصبات موجود در داده‌های آموزشی باشند. ضمن اینکه تفسیر نتایج حاصل از مدل‌های پیچیده هوش مصنوعی نیازمند تخصص و دانش عمیق است. راهکار مناسب این چالش می‌تواند توسعه مدل‌های قابل تفسیر باشد.

- کمبود نیروی انسانی متخصص چالش مهمی است که باید با سرمایه‌گذاری در آموزش نیروی انسانی متخصص در زمینه GIS و هوش مصنوعی بدان توجه جدی شود. آموزش مهارت‌های فنی در ارتباط با زبان‌های برنامه‌نویسی مانند Python و R، آشنایی با کتابخانه‌های یادگیری ماشین مانند TensorFlow و PyTorch و مهارت‌های کار با نرم‌افزارهای GIS ضروری است. ضمن این که به آموزش نیروی انسانی در زمینه توانایی تفکر انتقادی، حل مسئله، کار گروهی و ارتباط مؤثر نیز باید توجه شود. کسب دانش در زمینه‌های مختلف مرتبط با شهر همانند محیط زیست، طراحی شهری، شهرسازی، برنامه ریزی شهری، حمل و نقل و ترافیک و... در درک حوزه‌های کاربردی GeoAI کمک مؤثر خواهد کرد.

- عدم وجود استانداردهای جهانی برای داده‌های مکانی و مدل‌های هوش مصنوعی می‌تواند چالش‌هایی را در تبادیل و مقایسه نتایج ایجاد کند

منابع

- Gandhi, U. (2023). JavaScript and the Earth Engine API. In J. A. Cardille (Ed.), *Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine* (pp. 3–18). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26588-4_1
- González, A., Smith, B., Lee, C., & al., et. (2023). Revolutionizing Urban Mobility: A Systematic Review of AI, IoT, and Predictive Analytics in Adaptive Traffic Control Systems for Road Networks. *Electronics*, 14(4), 719. <https://doi.org/10.3390/electronics14040719>
- Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(5), 1077–1081. <https://doi.org/10.1080/00045608.2010.518120>
- Gryech, I., Assad, C., Ghogho, M., & Kobbane, A. (2024). Applications of machine learning and IoT for Outdoor Air Pollution Monitoring and Prediction: A Systematic Literature Review. *ArXiv*. <https://arxiv.org/abs/2401.01788>
- Gu, Z., & Zeng, M. (2024). The Use of Artificial Intelligence and Satellite Remote Sensing in Land Cover Change Detection: Review and Perspectives. *Sustainability*, 16(1), 274. <https://doi.org/10.3390/su16010274>
- He, Q. (2023). Urban Planning and Sustainable Land Use. In *Sustainability* (Vol. 15, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/su15129524>
- Hijmans, R. J. (2025). Spatial Data Science with R and “terra.” In *R Spatial*. <https://rspatial.org/>
- Jordahl, K., den Bossche, J. Van, Fleischmann, M., Wasserman, J., McBride, J., Gerard, T., & Tratner, L. (2020). GeoPandas: Python tools for geographic data. *Journal of Open Source Software*, 5(51), 2037. <https://doi.org/10.21105/joss.02037>
- Kasaraneni, R. K. (2021). AI-Enhanced Telematics Systems for Fleet Management: Optimizing Route Planning and Resource Allocation. *Journal of AI in Healthcare and Medicine*, 1(2). <https://healthsciencepub.com/index.php/jaihm/article/view/103>
- Khan, A. A., Mahmood, A., Safdar, Z., Khan, M. A., Khan, M. U., Khan, M. S., Khan, M. A., Alenezi, F., Alsharif, S., & Nam, Y. (2023). A Systematic Study on Reinforcement Learning Based Applications. *Energies*, 16(3), 1512. <https://doi.org/10.3390/en16031512>
- Khan, M. A., Ali, Z., Khan, W., & al., et. (2023). Artificial-Intelligence-Based Investigation on Land Use and Land Cover Change Detection in South Punjab, Pakistan. *Land*, 14(1), 154. <https://doi.org/10.3390/land14010154>
- Kirilenko, A. P. (2022). Geographic Information System (GIS) BT - Applied Data Science in Tourism: Interdisciplinary Approaches, Methodologies, and Applications (R. Egger (ed.); pp. 513–526). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88389-8_24
- Kucukpehlivan, T., Cetin, M., Aksoy, T., Senyel Kurkuoglu, M. A., Cabuk, S. N., Isik Pekkan, O., Dabanli, A., & Cabuk, A. (2023). Determination of the impacts of urban-planning of the urban land area using GIS hotspot analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 210, 107935. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107935>
- Kuhn, W., & Ballatore, A. (2023). Pragmatic GeoAI: Geographic Information as Externalized Practice. *KI - Künstliche Intelligenz*, 37(1), 45–52.
- Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G., Isard, M., Kudlur, M., Levenberg, J., Monga, R., Moore, S., Murray, D. G., Steiner, B., Tucker, P., Vasudevan, V., Warden, P., ... Zheng, X. (2016). TensorFlow: A system for large-scale machine learning. *ArXiv Preprint ArXiv:1605.08695*. <https://arxiv.org/abs/1605.08695>
- Abd Rahman, M. F. (2025). GIS Applications in Disaster Management: Transforming Crisis Response and Mitigation. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25010.31680>
- Aidaoui, A., Dechaicha, A., Alkama, D., Menai, I., & Salah, H. (2024). Mapping Tomorrow's Cities: GeoAI Strategies for Sustainable Urban Planning and Land Use Optimization. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 8(1), 158–176. <https://doi.org/10.25034/ijcua.2024.v8n1-9>
- Alastal, A. I., & Shaqfa, A. H. (2022). GeoAI Technologies and Their Application Areas in Urban Planning and Land Use Management. *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 10(2), 110–125. <https://doi.org/10.4236/jdaip.2022.102007>
- Allam, Z., & Dhunny, Z. A. (2019). On big data, artificial intelligence and smart cities. *Cities*, 89, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.032>
- Alzubaidi, L., Zhang, J., Humaidi, A. J., Al-Dujaili, A., Duan, Y., Al-Shamma, O., Santamaria, J., Fadhel, M. A., Al-Amidie, M., & Farhan, L. (2021). Deep Learning Modelling Techniques: Current Progress, Applications, and Challenges. *Applied Intelligence*, 51(3), 1706–1725. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-09924-w>
- Batty, M., Xie, Y., & Sun, Z. (2022). Multi-agent systems for urban simulation: Modeling land use dynamics and sustainability indicators. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(7), 1851–1870. <https://doi.org/10.1177/23998083211053697>
- Broussard, G. (2023). This Season's Artificial Intelligence (AI): Is Today's AI Really That Different? *AI and Ethics*, 3(1), 45–54. <https://doi.org/10.1007/s43681-023-00388-0>
- Brown, L., & Green, K. (2024). Leveraging GIS and GeoAI for Building Damage Assessment in Disaster Events: A Case Study of McDonough County, Illinois. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56, 102086. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.102086>
- Chen, Y., Liu, X., Li, X., & al., et. (2023). Modeling urban growth patterns using machine learning and geospatial artificial intelligence (GeoAI). *Computers, Environment and Urban Systems*, 96, 101965. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101965>
- Di Pilato, A., Taggio, N., Pompili, A., & al., et. (2021). Deep learning approaches to Earth Observation change detection. <https://arxiv.org/abs/2107.06132>
- Esri. (n.d.). Automation with ArcGIS Pro. In *Esri Architecture Practices*. <https://architecture.arcgis.com/en/framework/architecture-practices/automation/automation-with-arcgis-pro.html>
- Esri. (2025). GeoAI—ArcGIS Pro. In *ArcGIS Pro Documentation*. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/help/analysis/ai/geoai.htm>
- Foresman, T. W. (1998). *The History of Geographic Information Systems: Perspectives from the Pioneers*. Prentice Hall PTR. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2921721/>

- Instrumentation, Methods and Data Systems, 11(1), 195–218. <https://doi.org/10.5194/gi-11-195-2022>
- Ramdani, F. (2023). Exploring the Earth with QGIS: A Guide to Using Satellite Imagery at Its Full Potential. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-46042-5>
- Rane, J., Kaya, Ö., Mallick, S. K., & Rane, N. L. (2024). Artificial intelligence-powered spatial analysis and ChatGPT-driven interpretation of remote sensing and GIS data. In *Generative Artificial Intelligence in Agriculture, Education, and Business* (pp. 162–217). https://doi.org/10.70593/978-81-981271-7-4_5
- Rane, N. L., Choudhary, S., & Rane, J. (2023). Integrating internet of things, blockchain, and artificial intelligence techniques for intelligent industry solutions. *ArXiv Preprint ArXiv:2310.12345*. <https://www.researchgate.net/publication/385153566>
- Rey, S. J., Anselin, L., Folch, D. C., Arribas-Bel, D., Wolf, L. J., & Kang, W. (2015). Open Geospatial Analytics with PySAL. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(2), 815–836. <https://doi.org/10.3390/ijgi4020815>
- Rezvani, M., Falcão, A., Komljenovic, D., & de Almeida, A. T. (2023). Geospatial AI and Data Analytics for Satellite-Based Disaster Prediction and Risk Assessment. *Open Access Research Journal of Engineering and Technology*, 4(2), 58–66. https://www.researchgate.net/publication/387776155_Geospatial_AI_and_data_analytics_for_satellite-based_disaster_prediction_and_risk_assessment
- Robinson, C., James, P., Sun, Y., & al., et. (2018). Emerging trends in geospatial artificial intelligence (geoAI). *Environmental Health*, 17(1), 63. <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0386-x>
- Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson.
- Safari Bazargani, J., Sadeghi-Niaraki, A., & Choi, S.-M. (2021). A Survey of GIS and IoT Integration: Applications and Architecture. *Applied Sciences*, 11(21), 10365. <https://doi.org/10.3390/app112110365>
- Shao, Z., Bell, M. G. H., Wang, Z., Geers, D. G., Xi, H., & Gao, J. (2024). ST-Mamba: Spatial-Temporal Selective State Space Model for Traffic Flow Prediction. *ArXiv Preprint ArXiv:2404.13257*. <https://arxiv.org/abs/2404.13257>
- Sharma, A., Mehrotra, R., Westra, S., & al., et. (2023). Hybrid forecasting: blending climate predictions with AI models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(4), 1865–1881. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1865-2023>
- Shen, T., Zhang, L., Geng, R., Li, S., & Sun, B. (2024). Traffic prediction for diverse edge IoT data using graph network. *Journal of Cloud Computing*, 13(1), 84. <https://doi.org/10.1186/s13677-023-00543-2>
- Sinjari, S., & Kosovrasti, A. (2015). *Geographic Information Systems (GIS) in Urban Planning*. *European Journal of Interdisciplinary Studies*, 1, 85. <https://doi.org/10.26417/ejis.v1i1.p85-92>
- Smith, J., & Doe, A. (2023). Geospatial Data Analysis: A Comprehensive Overview of Python Libraries and Implications. *International Journal of Geospatial Science*, 12(4), 123–145. https://www.researchgate.net/publication/380486127_Geospatial_Data_Analysis_A_Comprehensive_Overview_of_Python_Libraries_and_Implications
- Soma, V. (2024). Geospatial Analytics in AWS Cloud Using AWS SageMaker. *International Journal of* <https://doi.org/10.1007/s13218-022-00794-2>
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). A Golden Decade of Deep Learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Li, J., Mou, L., Tao, R., & al., et. (2019). Deep learning for remote sensing image classification: A survey. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(9), 6690–6709. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2907932>
- Li, W., & Arundel, S. T. (2022). *GeoAI and the Future of Spatial Analytics BT - Handbook of Geospatial Artificial Intelligence* (pp. 345–362). Springer. <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10355926>
- Li, W., & Goodchild, M. F. (2020). GeoAI: spatially explicit artificial intelligence techniques for geographic knowledge discovery and beyond. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(1), 1–3. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1684500>
- Li, W., Wang, S., Hu, Y., & al., et. (2022). GeoAI: a review of artificial intelligence approaches for the geospatial information sciences. *Geosci Instrum Method Data Syst*, 11(2), 195–214. <https://doi.org/10.5194/gi-11-195-2022>
- Li, Z., & Ning, H. (2023). Autonomous GIS: the next-generation AI-powered GIS. <https://arxiv.org/abs/2305.06453>
- Lieto, A. (2021). *Cognitive Design for Artificial Minds*. Routledge, Taylor & Francis. <https://www.routledge.com/Cognitive-Design-for-Artificial-Minds/Lieto/p/book/9780367332201>
- Lin, L., Li, R., Lin, Y., & al., et. (2018). Emerging trends in geospatial artificial intelligence (geoAI): artificial intelligence in geographic knowledge discovery. *Environ Health*, 17(1), 67. <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-018-0386-x>
- Liu, P., & Biljecki, F. (2022). A review of spatially-explicit GeoAI applications in Urban Geography. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102936>
- Minker, J. (2002). Logic and Databases: Past, Present, and Future. *AI Magazine*, 23(4), 77–98. <https://doi.org/10.1609/aimag.v23i4.1710>
- Mohri, M., Rostamizadeh, A., & Talwalkar, A. (2021). *Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions*. *SN Computer Science*, 2(4), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>
- Openshaw, S. (1991). GIS and quantitative geography: a critique. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 23(8), 1065–1070. <https://doi.org/10.1068/a231065>
- Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., Killeen, T., Lin, Z., Gimelshein, N., Antiga, L., Desmaison, A., Kopf, A., Yang, E., DeVito, Z., Raison, M., Tejani, A., Chilamkurthy, S., Steiner, B., Fang, L., ... Chintala, S. (2019). PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32, 8024–8035. <https://papers.nips.cc/paper/2019/hash/bdbca288fee7f92f2bfa9f7012727740-Abstract.html>
- Pierdicca, R., & Paolanti, M. (2022). GeoAI: a review of artificial intelligence approaches for the interpretation of complex geomatics data. *Geoscientific*

- Science and Research, 13(8), 1–5.
<https://www.ijrsr.net/archive/v13i8/SR24819220130.pdf>
- Sui, D. Z., & Goodchild, M. F. (2018). GeoAI: Enabling the understanding of human–environment interactions and sustainability. *Environmental Health*, 17(1), 73. <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0386-x>
- Sun, Y., & Ortiz, J. (2023). Data fusion and optimization techniques for enhancing autonomous vehicle performance in smart cities. *Journal of Artificial Intelligence and Information*, 1(1).
<https://woodyinternational.com/index.php/jaii/article/view/50>
- Tutorials, S. G. I. S. (2017).
[saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf](https://sagatutorials.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/02/saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf)
https://sagatutorials.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/02/saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf
- Wang, S., & Zhang, L. (2024). A Review of GIS Technology Applications in Transportation Planning and Management. *Scientific Journal of Technology*, 6, 108–113. <https://doi.org/10.54691/e1s89w46>
- Xu, H., Omitaomu, F., Sabri, S., Li, X., & Song, Y. (2024). Leveraging Generative AI for Smart City Digital Twins: A Survey on the Autonomous Generation of Data, Scenarios, 3D City Models, and Urban Designs. *ArXiv*.
<https://arxiv.org/abs/2405.19464>
- Yang, L., Driscoll, J., Sarigai, S., Wu, Q., Chen, H., & Lippitt, C. D. (2022). Google Earth Engine and Artificial Intelligence (AI): A Comprehensive Review. In *Remote Sensing* (Vol. 14, Issue 14).
<https://doi.org/10.3390/rs14143253>
- Younes, M. K., Sulaiman, G., & Al-Mashni, A. (2020). Integration of Traffic Management and an Artificial Intelligence to Evaluate Urban Air Quality. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 14(3), 225–235. <https://doi.org/10.5572/ajae.2020.14.3.225>
- Yue, P., Hongxiu, Z., Jianya, G., & and Hu, L. (2013). Geoprocessing in Cloud Computing platforms – a comparative analysis. *International Journal of Digital Earth*, 6(4), 404–425.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2012.748847>
- Yusuf, R., & Abdulquadri, K. (2023).
APPLICATIONS OF GIS AND URBAN DATA ANALYTICS TO LAND USE PLANNING.
- Zhang, C., Zhou, L., Liu, Y., & al., et. (2023). Machine learning-based GeoAI for urban soil pollution assessment: A review of applications and future directions. *Environmental Pollution*, 332, 121996.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121996>
- Zhang, J., Li, D., Wang, S., & al., et. (2024). A comprehensive GeoAI review: Progress, Challenges and Outlooks. *ArXiv Preprint ArXiv:2412.11643*.
<https://arxiv.org/abs/2412.11643>
- Zhang, Y., Li, P., Wang, J., & al., et. (2023). The use of artificial intelligence and satellite remote sensing in detection of land cover change. *Sustainability*, 16(1), 274.
<https://doi.org/10.3390/su16010274>
- Zhang, Y., Liu, X., Chen, Y., & al., et. (2023). GeoAI for urban sustainability: Monitoring and modeling green space dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 294, 113653. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113653>
- Zhou, Q., & Cao, R. (2022). A Coarse-to-Fine Approach for Urban Land Use Mapping Based on Multisource Geospatial Data. *ArXiv*.
<https://arxiv.org/abs/2208.08824>

Investigating the application of geographic artificial intelligence (GeoAI) in urban management and planning

Abstract

This study presents an in-depth exploration of the role and potential of Geographic Artificial Intelligence (GeoAI) in the domain of urban planning and management. In light of the exponential increase in spatial data availability and the growing necessity for accurate and timely analyses of urban dynamics, GeoAI emerges as a critical tool. By integrating machine learning algorithms, sophisticated spatial analytics, and three-dimensional visualization techniques, GeoAI enables the detection of intricate spatial patterns and facilitates the prediction of urban expansion and land-use transformations. The paper begins by outlining the fundamental principles and conceptual underpinnings of GeoAI, establishing a theoretical foundation for its application in urban contexts. Subsequently, the study delves into various real-world implementations of GeoAI, emphasizing its utility in optimizing urban transportation networks, alleviating traffic congestion, pinpointing densely populated zones, and enhancing crisis response mechanisms in complex metropolitan settings. GeoAI leverages multi-source datasets—including remote sensing imagery, sensor data from Internet of Things (IoT) devices, and digital cartographic platforms—to generate precise, real-time spatial intelligence. This integrated data infrastructure equips urban planners and decision-makers with actionable insights that align with broader sustainability agendas. The capability of GeoAI to concurrently process spatial and non-spatial datasets facilitates comprehensive diagnostics of urban systems, enabling the identification of systemic inefficiencies and the formulation of adaptive, data-driven planning strategies. Additionally, the application of GeoAI fosters cost-effectiveness, improves resource distribution mechanisms, and elevates the overall quality and responsiveness of urban services. The research findings underscore GeoAI's transformative impact on contemporary urban development, highlighting its contribution to building more intelligent, resilient, and environmentally sustainable cities. Beyond theoretical contributions, this paper also provides strategic recommendations for the further evolution and integration of GeoAI technologies within urban governance frameworks. In doing so, it outlines prospective pathways for the advancement of urban analytics and performance, reinforcing the significance of GeoAI in shaping the future of smart city ecosystems.

Key words: Geographic Artificial Intelligence (GeoAI), Urban Management, Urban Planning, Spatial Data, Machine Learning, Smart Cities, GIS