

مقاله پژوهشی

مروری بر مطالعات تولید داده‌های ژئوشیمیایی اکتشافی: گذشته، حال و آینده

فرشته شیرالی

گروه فنی و مهندسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

چکیده

مطالعات شیمی معدنی برای جمع‌آوری داده‌ها در علوم زمین‌شناسی بسیار مهم است و به شناسایی منابع طبیعی و ارزیابی تأثیرات محیطی کمک می‌کند. هدف این مقاله عبارت است از: (۱) بررسی روش‌های تولید داده‌های شیمی معدنی برای درک بهتر ویژگی‌های داده‌های سنتی؛ (۲) بررسی تحولات جدید در استفاده از این داده‌ها، به‌ویژه تغییراتی که علم داده و هوش مصنوعی به‌وجود آورده‌اند؛ و (۳) پیش‌بینی نوع داده‌های شیمی معدنی در آینده که برای نیازهای مدرن و در حال تغییر مناسب باشد. این مقاله نشان می‌دهد که پیشرفت‌های فناوری و ابزارهای جدید امکان استخراج اطلاعات بی‌سابقه‌ای از داده‌های شیمی معدنی را فراهم کرده است. اما استفاده از داده‌های کوچک برای روش‌های داده‌های بزرگ ممکن است همیشه کارآمد نباشد. این چالش‌ها به‌دلیل تغییرات سریع در نیازهای داده‌ای در شیمی معدنی است که از تغییر رویکردهای علمی، پیشرفت‌های جدید در ژئومتالورژی، کمبود مهارت‌های لازم در آموزش، و افزایش تقاضا برای مواد خام ناشی می‌شود. اگرچه روش‌های قدیمی همچنان مفید هستند، اما باید روش‌های جدیدی برای جمع‌آوری داده‌های شیمی معدنی بزرگتر و کارآمدتر ایجاد شود. این تغییرات نیاز به آموزش جدید، استفاده از فناوری‌های مدرن، شفاف‌سازی مسئولیت‌ها و بهبود مدیریت داده‌ها دارند.

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



واژه‌های کلیدی:

داده‌های ژئوشیمیایی، داده‌های پتروفیزیکی، داده‌های معدنی

* نویسنده مسؤول: فرشته شیرالی

پست الکترونیکی: frsht.shirali@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.82281/jnec.2024.1209566>

مقدمه

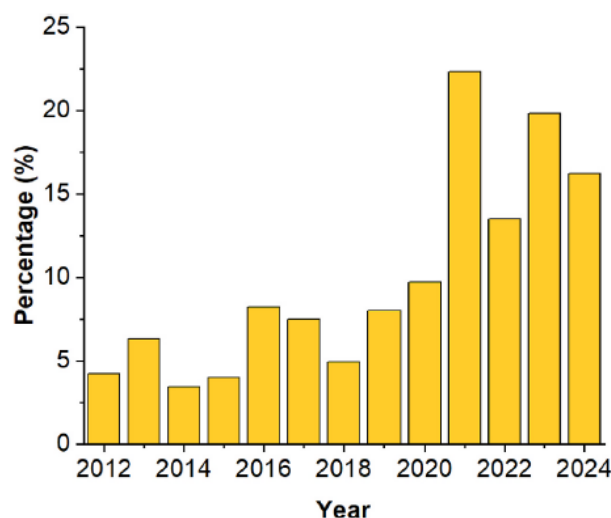
مطالعات ژئوشیمیایی یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای تولید داده‌های معدنی است. این مطالعات ارتباط ضروری بین دنیای فیزیکی و کاربران داده‌ها را برقرار می‌کند. هدف خاص این مطالعات در اکتشاف، ارائه داده‌هایی است که ممکن است به کشف معادن منجر شود [۱]. علاوه بر شناسایی ذخایر معدنی، داده‌های ژئوشیمیایی می‌توانند برای زمین‌شناسی (سنگ بستر)، پشتیبانی از توسعه روش‌ها، ارزیابی‌های زیست‌محیطی و سایر موارد مورد استفاده قرار گیرند [۲-۴].

به طور کلی، مطالعات ژئوشیمیایی یک فرآیند سیستماتیک و چند مرحله‌ای است که شامل: (۱) تولید داده‌ها (طراحی، بررسی، جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها و تعیین عناصر)؛ (۲) مدیریت داده‌ها (تضمین کیفیت و کنترل کیفیت، پردازش داده‌ها و مدیریت آن‌ها [۳] استفاده از داده‌ها (مدل‌سازی و تحلیل، و تأیید نتایج) است. [۲-۳]

داده‌های ژئوشیمیایی، مانند تمام داده‌های علوم زمین‌شناسی (داده‌های جغرافیایی)، به طور پیوسته در حال رشد از نظر حجم و پیچیدگی (شامل داده‌های هوش مصنوعی) هستند، که این رشد با افزایش توانمندی‌ها تسهیل شده است [۵]. برای مثال، پیشرفت‌ها در حمل‌ونقل و زیرساخت‌ها امکان نقشه‌برداری و نظرسنجی در مناطق دورافتاده‌تر را فراهم کرده است. به طور همزمان، پیشرفت علم تحلیل داده نیز قابلیت ابزارهای تحلیلی داده‌های حجیم‌تر و با ابعاد بیشتر را ایجاد کرده‌اند.

امروزه با وجود هوش مصنوعی، روش‌های محاسباتی به سرعت در حال تغییر در نحوه استفاده از داده‌ها است. این روش‌ها به جای استفاده از مدل‌های فرضی، به داده‌های زیاد و مدل‌هایی نیاز دارند که بتوانند سریع و با کیفیت بالا عمل کنند. با این حال، داده‌های ژئوشیمیایی سنتی به این نیازها نمی‌پردازند و این باعث ایجاد چالش‌هایی برای تولید و استفاده از داده‌ها می‌شود [۶-۸].

پیشرفت‌های تاریخی در روش‌های مطالعات ژئوشیمیایی بیشتر به سمت ساده‌سازی و تجزیه دقیق‌تر داده‌ها پیش رفته است. این داده‌ها برای آزمایش فرضیه‌ها و مدل‌ها دقیق‌تر و قابل تمیزتر شده‌اند. اما این روش‌های دقیق و زمان‌بر باعث شده‌اند که داده‌ها هزینه‌بر شوند. اکنون استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی بیشتر بر اساس داده‌های بزرگ است تا فرضیه‌ها. این تغییر در روش‌ها نشان‌دهنده یک تحلیل دقیق است، چون علم داده‌محور بیشتر بر ایجاد مدل‌های استنتاجی تمرکز دارد تا مدل‌های علت و معلولی [۹].



شکل ۱- درصد مقالات مرتبط با هوش مصنوعی منتشر شده در موضوع اکتشاف ژئوشیمی از ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴ در مجموع مجلات (اکتشافات ژئوشیمیایی، بررسی زمین‌شناسی سنگ معدن، تحقیقات منابع طبیعی، ژئوشیمی: اکتشاف، محیط زیست، تجزیه و تحلیل و کامپیوتر و علوم زمین) مورد بررسی قرار گرفتند. حجم سالانه به صورت تصادفی نمونه‌گیری شد، و مقالات (به عنوان مثال، تحقیق اصلی، مرور) شامل روش‌های هوش مصنوعی (از جمله یادگیری آماری اما صرفاً به استثنای آمار سنتی) شمارش شد.

داده‌های ژئوشیمیایی سنتی برای استفاده در تکنیک‌های مدل‌سازی با داده‌های بزرگ مناسب نیستند چون به سرعت بالاتر و حجم بیشتر داده نیاز دارند. برای اینکه این داده‌ها بتوانند با روش‌های مدرن همخوانی داشته باشند، باید ویژگی‌های خاصی مانند حجم بالا و سرعت زیاد داشته باشند که داده‌های سنتی این ویژگی‌ها را ندارند. بنابراین، استفاده از هوش مصنوعی در داده‌های ژئوشیمیایی در حال حاضر ناپایدار است، چون داده‌های موجود به اندازه کافی سریع و حجیم نیستند [۱۰].

در حال حاضر، استفاده از هوش مصنوعی بر داده‌های ژئوشیمیایی یک پدیده گذرا یا دوره‌ای محسوب می‌شود که به وفور داده‌های انباشته‌شده مرتبط است [۱۱]. جریان‌های مداوم داده‌های ژئوشیمیایی، مانند «کلان‌داده ژئوشیمیایی»، عموماً ناشناخته هستند [۱۱]. سرعت بالای داده‌ها

از نظر مفهومی برای ژئوشیمی اکتشافی ناآشنا است، زیرا تولید داده‌های ژئوشیمیایی، مانند نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل، در وضعیت فعلی فقط به صورت خطی مقیاس پذیر هستند.

اگر علم داده محور همچنان رشد کند، ژئوشیمی اکتشافی سنتی با چالش‌های جدیدی روبه‌رو خواهد شد. تاکنون بررسی دقیقی درباره نیازهای داده‌های ژئوشیمیایی، نحوه مدیریت، استفاده و آموزش آن‌ها با توجه به تغییرات سریع در الگوهای استفاده از داده و نیازهای جامعه (مثل حرکت به سمت انرژی‌های سبز) انجام نشده است. برای اطمینان از اینکه داده‌های آینده با نیازهای جدید هماهنگ باشند، لازم است شیوه‌های جمع‌آوری داده‌های ژئوشیمیایی مورد بازنگری قرار گیرند.

در این راستا، ما پیشرفت‌های مربوط به تولید داده‌های ژئوشیمیایی را مرور کرده و نقش ژئوشیمی اکتشافی را در طول زمان بررسی می‌کنیم. ابتدا تاریخچه این حوزه تا دهه ۱۹۹۰ را مرور کرده و به روش‌های بررسی، محدودیت‌ها و چالش‌های آن می‌پردازیم. سپس پیشرفت‌های جدید از دهه ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ را بررسی کرده و روش‌های کنونی و مسائل مهم را مورد بحث قرار می‌دهیم. در نهایت، چشم‌اندازی برای آینده ارائه خواهیم داد و مشخص می‌کنیم که کدام روش‌ها همچنان کاربردی خواهند ماند و کدام یک تغییر خواهند کرد.

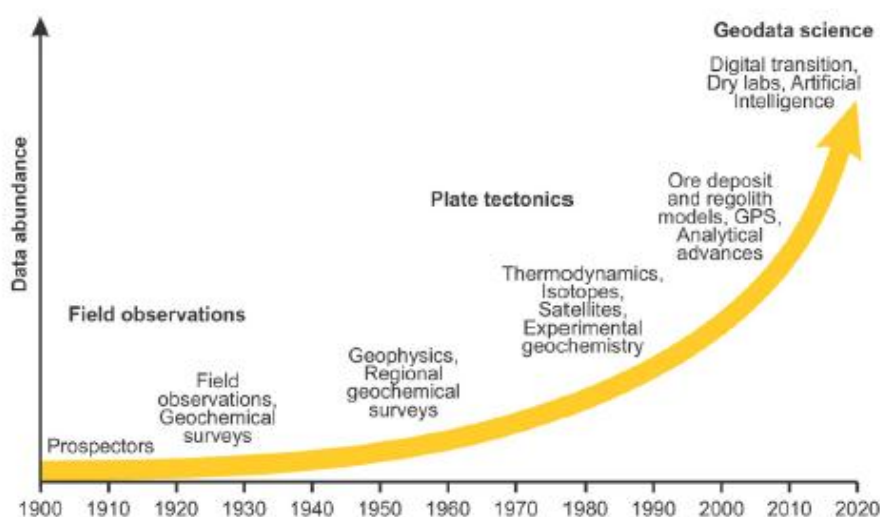
برای حفظ ارتباط بین دانشگاه، صنعت و دنیای واقعی، همچنین بررسی کوتاهی درباره مدیریت داده‌ها، آموزش و نیازهای عملی ارائه خواهیم داد، اما تمرکز اصلی ما بر تولید داده‌ها خواهد بود. هدف ما این است که همکاری بین زمین‌شناسان، مهندسان، دانشمندان داده و آمارشناسان تقویت شود تا ژئوشیمی اکتشافی بتواند با تغییرات جدید همگام شود و به پیشرفت خود ادامه دهد.

مروری بر ادبیات

تاریخچه

اولین بررسی‌های ژئوشیمیایی، قرن‌ها پیش توسط جویندگان معدنی انجام شد که برای یافتن مواد معدنی سنگین، رسوبات رودخانه‌ها را جستجو می‌کردند [۱۱] در اواخر دهه ۱۸۰۰ و اوایل ۱۹۰۰، آن‌ها از روش‌هایی مانند استفاده از بلوک کربنی و لوله دمشی برای شناسایی ترکیب شیمیایی این مواد استفاده می‌کردند [۱۲].

تحقیقات سیستماتیک ژئوشیمیایی برای اولین بار در دهه ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ در اتحاد جماهیر شوروی انجام شد. شکل (۲). این تحقیقات شامل پروژه‌هایی برای یافتن معادن قلع بود و از روش‌های جدیدی مانند طیف‌سنجی نوری برای شناسایی ترکیبات شیمیایی استفاده می‌کردند. پس از آن، این روش‌ها به سرعت در اروپا، آمریکای شمالی و آفریقا گسترش یافتند [۱۱].



شکل ۲- مروری بر تغییرات عمده در ژئوشیمی اکتشافی با توجه به فراوانی داده شکل الهام گرفته از سخنرانی ارائه شده توسط دکتر John F.H. تامپسون (دانشگاه کرنل؛ مشاوران پترا ساینس).

یکی از اولین پروژه‌های بزرگ در این زمینه بین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۷۵ توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا انجام شد. این پروژه که در مقیاس قاره‌ای اجرا شد، راه را برای بررسی‌های مدرن ژئوشیمیایی در مقیاس بزرگ باز کرد. در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، کشورهای مختلفی مانند کانادا، بریتانیا، فنلاند و چین، برنامه‌های ملی خود را برای بررسی ژئوشیمیایی راه‌اندازی کردند [۱۱].

در ابتدای این مطالعات، نمونه‌برداری با تراکم بالا (چندین نمونه در هر کیلومتر مربع) انجام می‌شد و معمولاً فقط از یک نوع نمونه، مثل رسوبات رودخانه‌ای، استفاده می‌شد. اما بعدها، روش‌های جدیدی معرفی شد که شامل نمونه‌برداری از خاک، رسوبات دریاچه‌ای، گیاهان و سنگ‌ها نیز می‌شد [۱۳].

تا دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، میزان نمونه‌برداری بسیار متنوع شد، به‌طوری که برای پروژه‌های اکتشافی هر کیلومتر مربع یک نمونه و برای پروژه‌های نقشه‌برداری در مقیاس بین‌المللی هر ۱۰,۰۰۰ کیلومتر مربع یک نمونه گرفته می‌شد. بررسی‌های اولیه نشان داد که نمونه‌های رسوبات رودخانه‌ای و دریاچه‌ای معمولاً نشان‌دهنده ترکیب کلی یک منطقه وسیع هستند، در حالی که نمونه‌های خاک و سنگ فقط اطلاعات محدوده اطراف خود را منعکس می‌کنند [۱۳].

ایجاد بستر طراحی مطالعات اکتشاف ژئوشیمیایی به زبان ساده

طراحی مطالعات ژئوشیمیایی در مقیاس‌های بزرگ‌تر سخت‌تر و پرهزینه‌تر است. این مطالعات باید به گونه‌ای طراحی شوند که در عین صرفه‌جویی در هزینه، بهترین نتایج را بدهند. هدف اصلی آن‌ها، یافتن منابع معدنی است. برای رسیدن به این هدف، دو اصل مهم رعایت می‌شود [۱۴]:

۱. نمونه‌برداری با بیشترین دقت ممکن در محدوده بودجه
 ۲. افزایش احتمال کشف ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی (نشانه‌های مواد معدنی)
- در گذشته، زمین‌شناسان و شرکت‌های معدنی همیشه به دنبال بهینه‌سازی این مطالعات بوده‌اند، اما تا دهه ۱۹۷۰ تحقیقات دقیق و علمی در این زمینه انجام نشده بود. اولین روش‌های علمی طراحی این مطالعات، از علم آمار و احتمال استفاده کردند [۱۱].
- برای برنامه‌ریزی بهتر نمونه‌برداری، باید اطلاعات اولیه‌ای از منطقه مورد مطالعه و نوع مواد معدنی احتمالی داشت. این اطلاعات شامل مواردی مانند اندازه و شکل معدن، نحوه پراکندگی مواد معدنی، ویژگی‌های زمین‌شناسی، شرایط آب‌وهوایی و نوع کانی‌سازی است [۱۵]. این داده‌ها معمولاً در مطالعات مقدماتی جمع‌آوری می‌شوند که هدف آن‌ها شناسایی مناطق مناسب برای بررسی‌های دقیق‌تر است [۲]. همچنین، مقیاس مطالعه مهم است؛ مثلاً بررسی یک معدن کوچک با بررسی یک منطقه وسیع برای یافتن نشانه‌های معدنی، روش‌های متفاوتی نیاز دارد [۱۵].
- برای تشخیص ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی، دانشمندان فاصله تقریبی از معدن تا نقطه‌ای که دیگر نشانه‌های مواد معدنی در خاک یا آب دیده نمی‌شود، را محاسبه می‌کنند [۱۶]. این مرز مشخص می‌کند که چه مناطقی دارای مواد معدنی هستند و چه مناطقی فاقد مواد معدنی هستند (شکل ۳- a و b) [۱۵].

تعیین این مرز کار ساده‌ای نیست، زیرا به عوامل مختلفی مانند نوع معدن، نوع سنگ‌های منطقه، شرایط محیطی و تاریخچه زمین‌شناسی آن بستگی دارد. برای پیدا کردن این مرز، نمونه‌هایی از مناطقی که ذخایر معدنی دارند، با نمونه‌هایی از مناطقی بدون ذخایر مقایسه می‌شوند. برای دقت بیشتر، بهتر است نمونه‌ها از مناطقی با زمین‌شناسی مشابه جمع‌آوری شوند. اما در عمل، همیشه این امکان وجود ندارد و نمونه‌ها ممکن است تفاوت‌هایی داشته باشند. برای حل این مشکل، از روش‌های آماری استفاده می‌شود که کمک می‌کنند مرز بین ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی و محیط‌های عادی را مشخص کنیم [۱۱].

در مطالعات ژئوشیمیایی، برای بررسی تغییرات مواد معدنی در سطح زمین از روش‌های آماری استفاده می‌شود تا بفهمیم چطور این مواد در مناطق مختلف پراکنده شده‌اند. یکی از این روش‌ها semi-variogram است که تغییرات ماده معدنی در فاصله‌های مختلف را بررسی می‌کند. این کار به ما کمک می‌کند که بدانیم آیا نمونه‌های نزدیک به هم مقادیر مشابه دارند یا خیر [۱۱].

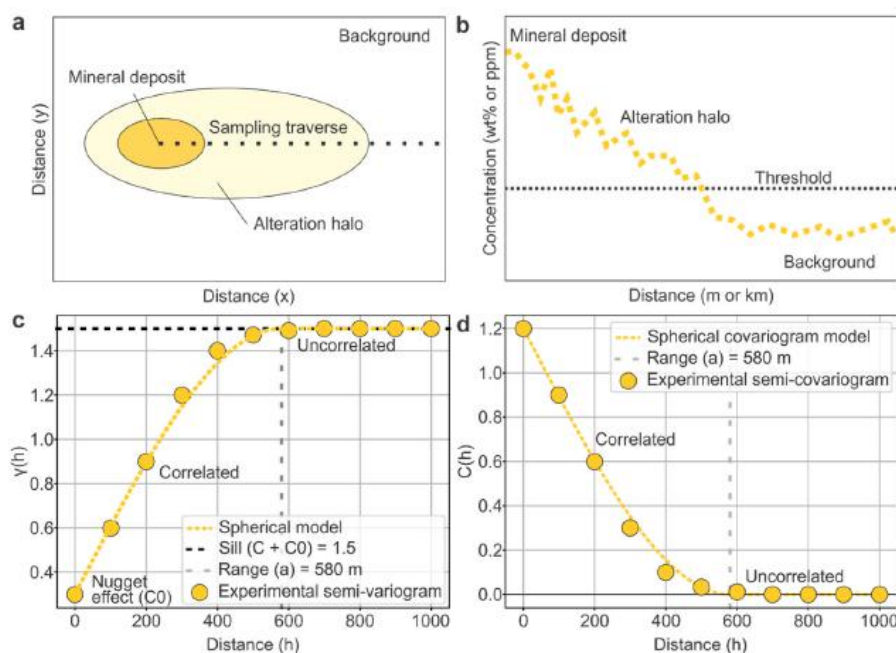
برای پیدا کردن فاصله بهینه بین نمونه‌ها، باید فاصله‌ای را انتخاب کنیم که نه خیلی دور باشد که نشانه‌های مهم از دست بروند و نه خیلی نزدیک که هزینه و زمان زیاد شود. معمولاً فاصله بین $\frac{1}{2}$ تا $\frac{1}{3}$ اندازه معدن تخمینی مناسب است (شکل ۳- c) [۱۱].

در طراحی نمونه‌برداری، مشکلاتی وجود دارد، چون معمولاً نمی‌دانیم ذخایر معدنی دقیقاً کجا هستند. به همین دلیل، روش نمونه‌برداری بیشتر بر اساس تجربه و دانش کارشناسان انتخاب می‌شود [۱۵].

مطالعات نشان می‌دهد که روش‌های مختلفی برای نمونه‌برداری وجود دارد که شامل:

۱. نمونه‌برداری شبکه‌ای: این روش در گذشته استاندارد بود، اما به دلیل مشکلات مختلف مانند تغییرات زمین‌شناسی، محدودیت‌هایی دارد.
۲. نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده: در این روش، نمونه‌ها به‌طور تصادفی از مناطق مختلف انتخاب می‌شوند.
۳. نمونه‌برداری سلسله‌مراتبی متعادل: این روش برای مقایسه تغییرات بین نمونه‌ها خوب است، اما به تعداد زیادی نمونه نیاز دارد.
۴. نمونه‌برداری سلسله‌مراتبی نامتعادل: این روش تعداد نمونه‌ها را کاهش می‌دهد ولی دقت را حفظ می‌کند.

با استفاده از این روش‌ها می‌توان طراحی بهتری برای مطالعات ژئوشیمیایی داشت و احتمال پیدا کردن ذخایر معدنی را بالا برد [۱۱].



شکل ۳- (الف) یک کانسار معدنی در منطقه‌ای مشخص دیده می‌شود. برای بررسی این منطقه، یک مسیر نمونه‌برداری (خط چین) تعیین شده است تا فاصله مناسب بین نمونه‌ها مشخص شود. (ب) مقدار یک عنصر شیمیایی در نمونه‌های جمع‌آوری شده از مسیر (الف) نشان داده شده است. این مقدار از محل کانسار به سمت مناطق اطراف کاهش می‌یابد. (ج) نمودار نیم‌واریوگرام که میزان تفاوت (نیم‌واریانس) بین نمونه‌ها را نسبت به فاصله آن‌ها نشان می‌دهد. نمونه‌هایی که فاصله کمی از هم دارند، به هم مرتبط هستند (مانند کانسار و هاله دگرسانی)، اما نمونه‌هایی که فاصله زیادی از هم دارند، دیگر مرتبط نیستند (مانند پس‌زمینه منطقه‌ای). (د) نمودار کواریوگرام که میزان شباهت (کوواریانس) بین نمونه‌ها را نسبت به فاصله آن‌ها نشان می‌دهد. این نمودار برعکس نیم‌واریوگرام عمل می‌کند و روشی دیگر برای بررسی ارتباط بین داده‌ها و تعیین برد آن‌ها است.

محدودیت‌ها و چالش‌های مطالعات ژئوشیمیایی قدیمی

مطالعات اولیه ژئوشیمیایی تنها می‌توانستند تعداد محدودی از عناصر را شناسایی کنند (حداکثر ۲۰ عنصر در مطالعات کانادایی دهه‌های ۱۹۶۰-۱۹۷۰).

یکی از کامل‌ترین نمونه‌ها، پروژه نقشه‌برداری ژئوشیمیایی در مقیاس قاره‌ای توسط USGS در دهه‌های ۱۹۶۰-۱۹۷۰ بود که غلظت ۵۰ عنصر مختلف را اندازه‌گیری کرد، از جمله Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Br, C, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, F, Fe, Ga, Ge, Hg, I, K, La, Li, Pb, Pr, Rb, S, Sb, Sc, Se, Si, Sn, Sr, Ti, Th, U, V, Y, Yb, Zn and Zr. اما برای ۳۰ تا از این عناصر، نتایج به‌طور تقریبی به دست آمدند و قابل استفاده در تحلیل‌های دقیق نبودند [۱۳]. در این زمان، روش‌های تحلیلی شامل فلورسانس اشعه ایکس، طیف‌سنجی ایتیکی، جذب اتمی و روش‌های دیگر بودند. بسیاری از مطالعات ژئوشیمیایی اولیه به دلیل نبود استانداردهای مشخص در نمونه‌برداری و تحلیل انتقاد شدند. برای حل این مشکل، برخی از پروژه‌های دولتی از پروتکل‌های استاندارد استفاده کردند [۱۳]. علاوه بر این، روش‌های تحلیلی موجود قادر به تشخیص دقیق در سطح پایین نبودند و این باعث محدودیت کیفیت داده‌ها می‌شد. با این حال، این مطالعات پایه‌گذار فهم ما از زمین و روش‌های کشف معادن بودند.

دوران معاصر (دهه ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰)

پیشرفت‌های مدرن

در دهه ۱۹۹۰، قیمت پایین مواد معدنی باعث شد شرکت‌های معدنی توجه کمتری به اکتشاف داشته باشند [۱۶] و بیشتر در مناطق نزدیک به معادن خود فعالیت کنند. به همین دلیل، استفاده از داده‌های قدیمی برای کشف منابع جدید رواج پیدا کرد. تا آن زمان، بیشتر ذخایر معدنی سطحی کشف شده بودند، بنابراین پژوهشگران به مطالعه خاک‌های سطحی پرداختند تا بتوانند ذخایر مدفون را با روش‌های ژئوشیمیایی

شناسایی کنند. این پژوهش‌ها باعث شد که مدل‌های فیزیکی مانند نحوه حرکت و انتشار عناصر در زمین برای کشف معادن استفاده شوند [۱۷]. در این دوره، علاوه بر نمونه‌برداری از خاک و سنگ، روش‌های جدیدی برای کشف منابع معدنی به کار گرفته شد، از جمله:

بررسی آب‌های زیرزمینی [۱۸]

تحلیل گازهای موجود در خاک [۱۹]

مطالعه گیاهانی که عناصر معدنی را جذب می‌کنند [۲۰]

استفاده از ایزوتوپ‌ها برای بررسی ترکیب مواد معدنی [۲۱]

این روش‌های نوین به توسعه مطالعات ژئوشیمیایی کمک کردند و به دوره‌ای وارد شدیم که از روش‌های سنتی فراتر رفت. با پیشرفت فناوری، روش‌های بررسی عناصر معدنی نیز بهبود یافتند [۲۲] از جمله:

۱. روش‌های استخراج انتخابی: امکان شناسایی دقیق‌تر عناصر از میان دیگر مواد موجود در خاک را فراهم کرد.

۲. کاهش حد تشخیص عناصر: یعنی امکان اندازه‌گیری مقادیر بسیار کم از عناصر فراهم شد که دقت نتایج را بالا برد.

۳. کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی: روش‌های جدید باعث شدند که آزمایش‌های ژئوشیمیایی سریع‌تر و ارزان‌تر شوند.

۴. بهبود دستگاه‌های تحلیلی: ابزارهایی مانند طیف‌سنج ICP-MS باعث افزایش دقت و سرعت آزمایش‌ها شدند.

۵. افزایش تعداد عناصر قابل شناسایی: امروزه امکان تحلیل بیش از ۴۰ عنصر مختلف در یک نمونه وجود دارد.

۶. کوچک‌تر شدن دستگاه‌های تحلیلی: دستگاه‌های قابل حمل مانند XRF و LIBS به محققان اجازه می‌دهند که در محل نمونه‌برداری، آزمایش‌های اولیه را انجام دهند.

کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت باعث شد که حجم نمونه‌های بررسی‌شده افزایش پیدا کند و برنامه‌های کنترل کیفیت (QA/QC) برای اطمینان از صحت نتایج، بیشتر مورد استفاده قرار بگیرند [۲۳]. یکی از مهم‌ترین تغییرات این دوره، پیشرفت فناوری اطلاعات و افزایش قدرت پردازش کامپیوترها بود که باعث شد:

دستگاه‌های تحلیلی دقیق‌تر شوند* و داده‌های بهتری تولید کنند [۲۴]

تحلیل نمونه‌ها به کمک الگوریتم‌های پیشرفته انجام شود* تا خطاهای انسانی کاهش یابد. [۱۱]

فرآیندهای آزمایشگاهی خودکار شوند* و نیاز به نیروی انسانی کمتر شود. [۱۱]

نرم‌افزارهای مدرن برای پردازش داده‌های ژئوشیمیایی توسعه یابند که کار تحلیل داده‌ها را آسان‌تر کنند [۲۵].

استفاده از دستگاه‌های دیجیتال مانند تبلت و تلفن همراه در تحقیقات میدانی نیز افزایش یافت، زیرا این دستگاه‌ها مجهز به دوربین، قطب‌نما، GPS و سایر حسگرهای مفید هستند که اطلاعاتی دقیق در مورد موقعیت و شرایط محیطی فراهم می‌کنند.

با پیشرفت نرم‌افزارهای تخصصی مانند ArcGIS، Google Earth Pro و QGIS، داده‌های ژئوشیمیایی به راحتی روی نقشه نمایش داده می‌شوند و تحلیل آن‌ها آسان‌تر شده است. همچنین، زبان‌های برنامه‌نویسی و ابزارهایی مانند Python، MATLAB و R امکان تحلیل پیشرفته داده‌ها را فراهم کرده‌اند [۲۶]. با افزایش حجم داده‌های ژئوشیمیایی، نیاز به سیستم‌های مدیریت داده بیشتر شد تا اطلاعات به صورت سازمان‌یافته ذخیره و استفاده شوند. با این حال، این سیستم‌ها هنوز در حال توسعه هستند و نیاز به بهبود دارند [۲۵]. پس در یک جمع‌بندی کلی می‌توان بیان کرد که در دهه‌های اخیر، پیشرفت فناوری باعث شده است که اکتشافات ژئوشیمیایی دقیق‌تر، سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر شوند. استفاده از روش‌های جدید نمونه‌برداری، دستگاه‌های قابل حمل، نرم‌افزارهای تخصصی و داده‌های دیجیتال، به زمین‌شناسان کمک کرده است که اطلاعات بیشتری درباره ترکیب مواد معدنی و پراکندگی آن‌ها در زمین به دست آورند.

برجسته‌ترین مسائل در اکتشافات ژئوشیمیایی

روش‌های کنونی در اکتشافات ژئوشیمیایی

در حال حاضر، بررسی‌های ژئوشیمیایی چند عنصری با استفاده از نمونه‌های مختلف مانند رسوبات رودخانه‌ای، خاک، آب دریاچه، پوشش گیاهی، سنگ و رسوبات یخچالی، همچنان به عنوان پایه‌ی اصلی اکتشافات ژئوشیمیایی در مقیاس منطقه‌ای به شمار می‌روند. در بررسی‌های ژئوشیمیایی منطقه‌ای که توسط سازمان زمین‌شناسی کانادا انجام شده است، از رسوبات دریاچه‌ای استفاده شده است. طراحی و برنامه‌ریزی این نوع بررسی‌ها همچنان بر اساس اصولی است که از دهه ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰ توسعه یافته‌اند. معمولاً این نوع بررسی‌ها در مقیاس نقشه ۱:۲۵۰,۰۰۰ برنامه‌ریزی شده و نمونه‌برداری با تراکم ۱ نمونه در هر ۱۳ کیلومتر مربع انجام می‌شود که در برخی مناطق به ۱ نمونه در هر ۶ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد. از آنجایی که جمع‌آوری نمونه‌های رسوبات دریاچه‌ای به طور سیستماتیک امکان‌پذیر نیست، از روش شبکه تصادفی طبقه‌بندی‌شده استفاده می‌شود. دریاچه‌هایی که بین ۱ تا ۵ کیلومتر طول دارند و عمق آن‌ها بیش از ۳ متر است، ترجیح داده می‌شوند؛ زیرا این دریاچه‌ها حاوی رسوبات آلی بیشتری هستند که برای تعیین عناصر معدنی مطلوب است. برای جمع‌آوری نمونه‌ها، از هلیکوپترهایی

که دارای شناور هستند استفاده می‌شود. این هلیکوپترها در مرکز دریاچه فرود آمده و حدود ۱,۲ کیلوگرم از رسوبات کف دریاچه را با استفاده از یک سامانه نمونه‌برداری ثقلی موسوم به "تورنادو گراویتی" جمع‌آوری می‌کنند. سپس نمونه‌ها در کیسه‌های مخصوص قرار گرفته، برچسب‌گذاری شده، در دمای کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ روز خشک شده و پس از الک شدن تا اندازه ۱۷۷ میکرون (مش ۸۰)، برای نگهداری طولانی‌مدت در ظروف مخصوص ذخیره می‌شوند. در مطالعات گسترده، برای بهره‌گیری از پیشرفت‌های تحلیلی در آینده، مقدار بیشتری از هر نمونه جمع‌آوری می‌شود تا امکان بازتحلیل مجدد داده‌های قدیمی وجود داشته باشد. این کار بسیار مقرون‌به‌صرفه‌تر از نمونه‌برداری مجدد است و هزینه‌ای در حدود ۵٪ هزینه یک بررسی جدید را در بر دارد [۱۱].

نمونه‌های جمع‌آوری‌شده عمدتاً در آزمایشگاه‌های تجاری با استفاده از روش طیف‌سنجی جرمی با پلاسمای القایی (ICP-MS)* برای شناسایی ۶۵ عنصر و در برخی موارد با روش فعال‌سازی نوترونی (INAA)* برای بررسی ۳۵ عنصر تحلیل می‌شوند. پس از آن، داده‌ها از نظر دقت، صحت و انطباق با اهداف پژوهشی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت، اطلاعات به‌صورت عمومی منتشر می‌شود [۱۱].

به طور کلی، از شروع یک بررسی تا انتشار نهایی داده‌ها ممکن است سال‌ها یا حتی دهه‌ها طول بکشد. عوامل اجتماعی، سیاسی و زیست‌محیطی معمولاً باعث تأخیرهای پیش‌بینی‌نشده در این فرآیند می‌شوند. همچنین، این مطالعات به منابع مالی و انسانی زیادی نیاز دارند. برای مثال، هزینه یک مطالعه نمونه‌برداری از رسوبات دریاچه‌ای در مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ بر روی منطقه‌ای با مساحت حدود ۱۴,۰۰۰ کیلومتر مربع (مشابه یک ناحیه در سیستم نقشه‌برداری کانادا) در سال ۲۰۲۲، حدود ۴۳۰,۰۰۰ دلار آمریکا برآورد شده است. تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی، همانند تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی، یک مسئله معکوس (Inverse Problem) است، به این معنی که برای یک مجموعه داده، تنها یک پاسخ قطعی وجود ندارد. انتقال و اختلاط مواد معدنی در طبیعت باعث ایجاد پراکندگی عناصر در محیط می‌شود که این پراکندگی اطلاعات مفیدی درباره منابع معدنی فراهم می‌کند، اما همزمان باعث افزایش آنتروپی (بی‌نظمی) در داده‌ها نیز می‌شود. به همین دلیل، هیچ روش واحد و ایده‌آلی برای پردازش و تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی وجود ندارد و این موضوع همچنان مورد تحقیق و بررسی است [۱۱].

روش‌های مختلفی برای شناسایی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل:

۱. روش‌های بصری‌سازی داده‌ها

در این روش‌ها، اطلاعات ژئوشیمیایی بر روی نقشه نمایش داده می‌شود و تحلیل توسط انسان انجام می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) اشاره کرد. این روش برای داده‌های ساده و دوبعدی مفید است، اما برای تحلیل‌های پیچیده محدودیت دارد [۲۷-۲۹].

۲. روش‌های آماری تک‌متغیره

این روش‌ها شامل تحلیل توزیع داده‌ها، شناسایی مقادیر پرت، بررسی میانگین، انحراف معیار، درصدها، نمودارهای Q-Q، تحلیل توزیع تجمعی و سایر روش‌های کلاسیک آماری می‌شود [۲۸].

۳. روش‌های آماری چندمتغیره

این روش‌ها ارتباط بین متغیرهای مختلف را بررسی می‌کنند تا الگوهای توزیع مواد معدنی شناسایی شوند. برخی از روش‌های متداول شامل تحلیل

مؤلفه‌های اصلی (PCA)، تحلیل عاملی، تحلیل خوشه‌ای و سایر مدل‌های چندمتغیره هستند [۲۸].

۴. روش‌های زمین‌آماري^۱

این روش‌ها شامل تحلیل واریوگرافی، کریجینگ^۲، شبیه‌سازی تصادفی و سایر مدل‌های زمین‌آماري است که به تخمین ویژگی‌های زمین در مکان‌هایی که نمونه‌برداری انجام نشده کمک می‌کند [۳۰].

۵. مدل‌های فراکتالی و چندفراکتالی

این روش‌ها از الگوهای توزیع فراکتالی برای شناسایی ذخایر معدنی استفاده می‌کنند. برخی از روش‌های رایج شامل مدل‌های غلظت-مساحت [۳۲]، غلظت-فاصله [۳۱] و غلظت-حجم [۳۳] هستند.

روش‌های هوش مصنوعی

امروزه، روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین^۱ و هوش مصنوعی به‌طور گسترده برای تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی استفاده می‌شوند [۳۴] این روش‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

یادگیری نظارت‌شده^۲ که از داده‌های قبلی برای پیش‌بینی مکان ذخایر معدنی استفاده می‌کند.

یادگیری بدون نظارت^۳ که الگوهای پنهان و ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی را بدون نیاز به داده‌های آموزشی شناسایی می‌کند.

پس در جمع‌بندی این بخش میتوان بیان کرد که روش‌های ژئوشیمیایی همچنان یکی از اصلی‌ترین ابزارهای اکتشاف منابع معدنی در مقیاس منطقه‌ای هستند. امروزه با استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند نقشه‌برداری دیجیتال، پردازش داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی*، تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی با دقت و کارایی بیشتری انجام می‌شود. با این حال، این روش‌ها همچنان نیاز به بهبود دارند و شناسایی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی یکی از چالش‌های مهم محققان این حوزه محسوب می‌شود.

تغییر نقش‌ها و مسئولیت‌ها در اکتشاف

در گذشته، زمین‌شناسانی که داده‌های ژئوشیمیایی را جمع‌آوری می‌کردند، خودشان هم آن‌ها را تحلیل می‌کردند. اما امروزه، تولید و استفاده از داده‌ها به دو بخش جداگانه تبدیل شده است. این موضوع باعث شده که روش‌های قدیمی دیگر کارایی لازم را نداشته باشند، زیرا هم جمع‌آوری داده‌ها پیچیده‌تر شده و هم از این داده‌ها در حوزه‌های مختلفی مانند نقشه‌برداری پتانسیل معدنی (MPM) استفاده می‌شود. مشکل اینجاست که دیگر نمی‌توان از یک گروه کوچک انتظار داشت که هم در جمع‌آوری داده، هم در مدیریت آن و هم در تحلیل‌های علمی متخصص باشند. در علوم زمین و رشته‌های مرتبط، معمولاً افراد در یک حوزه خاص تخصص پیدا می‌کنند. به همین دلیل، فاصله بین کسانی که داده تولید می‌کنند و کسانی که از آن استفاده می‌کنند، در حال افزایش است. برخی پیشنهاد کرده‌اند که تولیدکنندگان داده و تحلیل‌گران، هر دو باید مهارت‌های یکدیگر را یاد بگیرند. اما این روش چندان موفق نبوده، زیرا علاقه و توانایی این دو گروه متفاوت است. تولیدکنندگان داده بیشتر به کارهای عملی و مشاهده‌ای علاقه دارند، در حالی که کاربران داده روی تحلیل‌های ریاضی، آمار و الگوریتم‌ها تمرکز می‌کنند. از آنجا که تعداد افرادی که به هر دو حوزه علاقه‌مند باشند، کم است، آموزش متقابل کارایی ندارد. در بسیاری از علوم دیگر، نقش‌های جداگانه‌ای برای جمع‌آوری‌کنندگان داده و تحلیل‌گران تعریف شده است. بنابراین، در حوزه ژئوشیمی هم نیاز به یک گروه واسطه بین تولیدکنندگان و کاربران داده احساس می‌شود، اما در حال حاضر چنین تخصصی وجود ندارد [۱۱].

نیازهای ژئومتالورژیکی و فرآیندهای بعدی

اکتشاف ژئوشیمیایی امروزه با در نظر گرفتن فرآیندهای بعدی مانند معدنکاری و فرآوری مواد معدنی انجام می‌شود. ژئومتالورژی، که ترکیبی از علوم زمین، معدن و متالورژی است، کمک می‌کند تا اطلاعات از همان مراحل اولیه اکتشاف جمع‌آوری شده و در تصمیم‌گیری‌های بعدی استفاده شود.

در گذشته، مراحل مختلف معدنکاری و فرآوری مواد معدنی جدا از هم بودند، اما این روش زمان‌بر و پرهزینه است. ژئومتالورژی با یکپارچه‌سازی داده‌ها، روند کار را سریع‌تر و بهینه‌تر می‌کند. این رویکرد کمک می‌کند تا قبل از استخراج، بدانیم که آیا ماده معدنی ارزش فرآوری و استخراج اقتصادی دارد یا خیر.

همچنین، ژئومتالورژی باعث می‌شود اطلاعاتی درباره مواد جانبی و عناصر نادر که ممکن است در گذشته نادیده گرفته شده باشند، جمع‌آوری شود. به این ترتیب، استخراج مواد معدنی با در نظر گرفتن بیشترین بازدهی اقتصادی و کمترین آسیب زیست‌محیطی انجام می‌شود [۱۱].

آموزش و مشاغل

امروزه تعداد افرادی که در رشته‌های علوم زمین فارغ‌التحصیل می‌شوند، کاهش یافته است و بسیاری از برنامه‌های درسی دانشگاهی نیازهای واقعی صنعت را پوشش نمی‌دهند. مهارت‌هایی مانند ریاضیات، برنامه‌نویسی، تحلیل داده‌ها و تفکر سیستمی در آموزش علوم زمین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، در حالی که این مهارت‌ها برای درک و استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی ضروری هستند.

همچنین، مشکل دیگر این است که داده‌های ژئوشیمیایی به‌صورت تدریجی جمع‌آوری می‌شوند و سرعت تولید داده‌ها پایین است. این موضوع باعث شده است که استفاده از هوش مصنوعی و تحلیل داده در این حوزه دشوار باشد، زیرا مدل‌های یادگیری ماشین برای عملکرد صحیح،

1 Machine Learning
2 Supervised Learning
3 Unsupervised Learning

به داده‌های مداوم و به‌روز نیاز دارند. در حالی که در سایر صنایع مانند پزشکی و مالی، مدل‌های داده‌محور مدام به‌روزرسانی و بررسی می‌شوند، در علوم زمین این کار به‌ندرت اتفاق می‌افتد [۱۱].

نیازهای مواد خام برای آینده

تقاضا برای مواد معدنی با گذر زمان تغییر می‌کند. برای مثال، در گذشته عناصر نادر خاکی ارزش چندانی نداشتند، اما امروزه برای ساخت وسایل الکترونیکی، تجهیزات نظامی و انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار مهم شده‌اند. کشورها اکنون تلاش می‌کنند تا در استخراج مواد معدنی خودکفا شوند و وابستگی خود را به منابع خارجی کاهش دهند. همچنین، به‌دلیل افزایش تقاضا برای انرژی پایدار، نیاز به استخراج بیشتر موادی مانند لیتیوم و کبالت وجود دارد. این تغییرات نشان می‌دهد که اکتشاف و فرآوری مواد معدنی باید با برنامه‌ریزی دقیق و در نظر گرفتن شرایط اقتصادی، زیست‌محیطی و سیاسی انجام شود. تمایل بی‌پایان به مواد معدنی با زمان طولانی استخراج مواجه است. به طور متوسط، از زمانی که اولین شواهد معدنی شناسایی می‌شود تا استخراج واقعی، حدود ۱۷ سال طول می‌کشد [۱۱].

سوالی که مطرح است این است که آیا روش‌های سنتی به تنهایی می‌توانند به سرعت نیازهای فوری برای انرژی پایدار و کاهش مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی را برآورده کنند یا خیر. بسیاری از کشورها که به اهداف برنامه ۲۰۳۰* یا ۲۰۵۰* کربن صفر تا ۲۰۵۰* پایبند هستند، زمان کمی برای رسیدن به این اهداف دارند. همچنین این فرض وجود دارد که اکتشافات جدید با همان سرعت گذشته انجام می‌شود، که این احتمال کم است [۱۱].

با این حال، امید به استفاده از روش‌های مبتنی بر داده‌ها برای تسریع اکتشاف‌ها وجود دارد [۱۱]. از آنجا که تولید داده‌ها یکی از مشکلات اصلی در اکتشافات معدنی است، پیدا کردن روش‌هایی برای سرعت بخشیدن به این فرآیند می‌تواند کمک زیادی به حل مشکلات آتی کند.

آینده (دهه ۲۰۲۰ و فراتر از آن)

استفاده از روش‌های سنتی

روش‌های شیمی معدنی سنتی در آینده ادامه خواهند داشت. هنوز نیاز به داده‌های دقیق وجود دارد تا بتوان فرضیات و مدل‌ها را آزمایش کرد. این نیاز به آزمایشگاه‌های پیشرفته مانند XRF، ICP-MS و SEM دارد. داده‌های علمی برای موارد زیر ضروری هستند:

۱. مطالعه فرآیندهای تشکیل ذخایر معدنی،
۲. ایجاد مدل‌های اکتشافی و متالوژیک،
۳. ادغام داده‌ها در مقیاس‌های مختلف،
۴. استفاده از انواع نمونه‌های جدید،
۵. بهبود روش‌های تحلیلی.

تغییرات مورد انتظار در نیازهای داده‌ها

برای پیشرفت علوم زمین، داده‌های شیمی معدنی باید تغییر کنند. نیازهای جدید شامل موارد زیر است:

۱. افزایش سرعت تولید داده‌ها،
۲. افزایش دقت فضایی (تعداد داده‌ها در هر منطقه)،
۳. یکپارچگی بیشتر داده‌ها با اندازه‌گیری‌های دیگر،
۴. مدیریت بهتر داده‌ها به‌طوری‌که برای کسانی که شیمی معدنی نمی‌دانند هم قابل استفاده باشد،

انعطاف‌پذیری بیشتر و کاهش استفاده از شبکه‌های ثابت

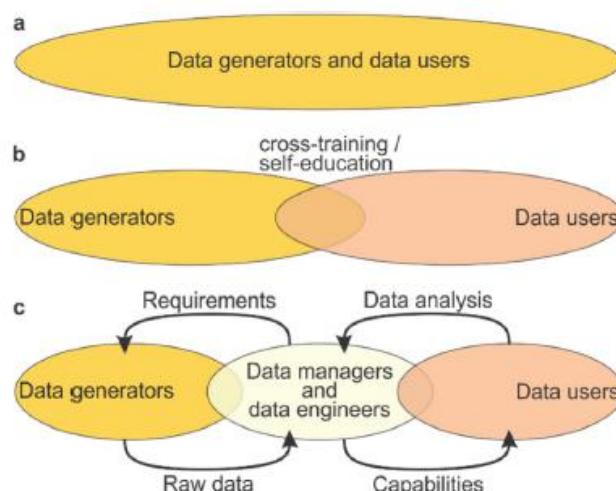
ابزارهای پرتابل (مثل pXRF و LIBS) برای تولید سریع داده‌ها و کاهش هزینه‌ها در حال گسترش هستند. این ابزارها در اکتشاف معدنی و بررسی نمونه‌های چاه‌های حفاری استفاده می‌شوند [۱۱].

پذیرش ابزارهای جدید

ابزارهای پرتابل به دلیل ویژگی‌هایی مانند سرعت بالا، هزینه کم و استفاده آسان در محل محبوب هستند. هرچند کیفیت داده‌های آن‌ها ممکن است پایین‌تر از آزمایشگاه‌های سنتی باشد، اما این ابزارها در تحلیل داده‌های بزرگ کاربرد دارند و می‌توانند مدل‌ها را بهبود دهند. در اکتشاف‌های معدنی و نظارت بر معادن استفاده از این ابزارها در حال رشد است [۱۱].

تحول در داده‌ها و مسئولیت‌های جدید

با افزایش حجم داده‌های شیمی معدنی، نیاز به مدیریت بهتر داده‌ها بیشتر می‌شود. برای این کار، ایجاد نقش‌های جدیدی مانند مدیران داده و مهندسان داده ضروری است. این افراد مسئول بررسی کیفیت داده‌ها و پردازش داده‌ها هستند و باید مطمئن شوند که داده‌ها به راحتی در دسترس و قابل استفاده برای دیگران باشند.



شکل ۴-۴- نمایش شماییک تخصص مولد داده‌های جغرافیایی و کاربران (a) از نظر تاریخی، مولدهای داده‌های جغرافیایی نیز کاربران داده بودند. (b) در حال حاضر، یک واگرایی بین مولدهای داده‌های جغرافیایی و داده‌های مدرن وجود دارد (به عنوان مثال، کارشناسان هوش مصنوعی) و طرفداران این حوزه (به عنوان مثال، او و همکاران، ۲۰۲۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲) آموزش‌هایی را برای پر کردن شکاف پیشنهاد کرده‌اند. (c) پیشنهادات آینده که مدیریت داده حاکم گردد

بازنگری در آموزش علم داده‌ها

علم داده‌های جغرافیایی هنوز در حال شروع است و تعداد کمی از دانشگاه‌ها آن را به‌طور رسمی تدریس می‌کنند. این مشکل در شیمی معدنی اکتشافی بیشتر به چشم می‌آید، چون این علم به شدت به داده و برنامه‌نویسی نیاز دارد. به دلیل پیشرفت سریع فناوری‌ها، این علم در حال تغییر و تحول است، اما ممکن است به‌زودی با محدودیت‌های فنی مواجه شود. به همین دلیل، پیش‌بینی تأثیرات آن سخت است. اکثر دانشگاه‌ها هنوز علم داده را در بخش علوم کامپیوتر تدریس می‌کنند و آموزش‌های غیررسمی (مثل دوره‌ها و کارگاه‌ها) به اندازه کافی برای آموزش استعداد‌های مورد نیاز نیست. برنامه‌های آموزشی برای آینده باید شامل یادگیری داده‌کاوی، آمار، برنامه‌نویسی، مدیریت پروژه و استفاده از داده‌ها باشد. این آموزش‌ها باید کمک کنند تا دانشمندان اکتشافی آینده در استفاده یا تولید داده‌ها مهارت پیدا کنند. آموزش‌ها باید به‌جای تخصص در شاخه‌های مختلف زمین‌شناسی، بر دانش در سراسر فرآیند داده‌ها تمرکز کنند. این کار باعث همکاری بهتر بین رشته‌ها و فهم عمیق‌تر از داده‌ها می‌شود. همچنین، آموزش‌های عمومی‌تر در این حوزه کمک می‌کند که دانشمندان اکتشافی آینده بتوانند پروژه‌های بزرگ را رهبری کنند.

در نهایت، آموزش‌ها باید شامل مدیریت داده‌ها و پروژه‌های مبتنی بر داده باشد تا متخصصان آینده بتوانند از تمام ظرفیت داده‌ها استفاده کنند و از روش‌های ناکارآمد جلوگیری کنند.

نتیجه‌گیری

در این بررسی، نشان داده شده که اکتشاف شیمی معدنی می‌تواند به‌طور قابل توجهی تغییر کند تا برای هدف‌های امروزی مناسب‌تر باشد. آینده شیمی معدنی اکتشافی به این بستگی دارد که تأثیر فناوری‌های جدید بر تولید داده‌ها در نظر گرفته شود. مهم است که نوع جدیدی از داده‌های شیمی معدنی طراحی شود که بتواند با روش‌های مدرن استفاده از داده‌ها سازگار باشد و قابلیت پردازش در مقیاس بزرگ‌تری را داشته باشد. چون روش‌های قدیمی تولید داده‌های شیمی معدنی نمی‌توانند با این نیازهای جدید همخوانی داشته باشند. به‌ویژه باید بر طراحی

نظرسنجی‌هایی تمرکز کنیم که امکان جمع‌آوری داده‌های شیمی معدنی با دقت بیشتر را فراهم کنند، با استفاده از آزمایش‌های پیش‌بینی، داده‌های ثانویه و ابزارهای قابل حمل، که هزینه‌ها را کاهش داده و سرعت کار را افزایش دهند.

این بررسی نشان داده است که تولید داده در اکتشاف شیمی معدنی در آستانه تغییرات بزرگی است. البته چالش‌هایی وجود دارد، از جمله نیاز به مدیریت دقیق داده‌ها و ایجاد برنامه‌های آموزشی مناسب. با این حال، مزایای این تغییرات، مانند کاهش هزینه‌ها، بهبود سرعت کار و افزایش پایداری، باعث می‌شود که تحقیق در زمینه داده‌های شیمی معدنی بزرگ‌تر و ارزان‌تر باید با جدیت دنبال شود. همچنین نشان داده شده که اکتشاف شیمی معدنی باید به تکامل خود ادامه دهد، زیرا استفاده از داده‌ها در این حوزه تغییرات زیادی داشته است و تأثیرات آن هنوز به‌طور کامل درک نشده است. فقط با پذیرش این تغییرات در علوم زمین‌شناسی و نیازهای جدید منابع، شیمی معدنی اکتشافی می‌تواند در آینده به خوبی پیشرفت کند.

References

- Haldar, S.K., 2018. Exploration geochemistry. In: Haldar, S.K. (Ed.), Mineral Exploration, second ed. Elsevier, pp. 85–101. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814022-2.00005-8>.
- Demetrides, A., Smith, D.B., Wang, X., 2018. General concepts of geochemical mapping at global, regional, and local scales for mineral exploration and environmental purposes. *Geochim. Bras.* 32 (2), 136–179. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2018322136>.
- Hosseini-Dinani, H., Mokhtari, A.R., Shahrestani, S., De Vivo, B., 2018. Sampling density in regional exploration and environmental geochemical studies: a review. *Nat. Resour. Res.* 28, 967–994. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9431-2>.
- Garrett, R.G., 1983. Sampling methodology. In: Howarth, R.J. (Ed.), Statistics and Data Analysis in Geochemical Prospecting, 2. Elsevier Science, pp. 83–100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42038-1.50010-1>.
- Talapatra, A.K., 2020. Geochemical Exploration and Modelling of Concealed Mineral Deposits. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48756-0>.
- Zhang, S.E., Nwaila, G.T., Bourdeau, J.E., Ghorbani, Y., Carranza, E.J.M., 2023c. Deriving big geochemical data from high-resolution remote sensing data via machine learning: application to a tailing storage facility in the Witwatersrand goldfields. *Artif. Intell. Geosci.* 4, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.aiig.2023.01.005>.
- Zuo, R., Xu, Y., 2023. Graph deep learning model for mapping mineral prospectivity. *Math. Geosci.* 55 (1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11004-022-10015-z>.
- Zuo, R., 2020. Geodata science-based mineral prospectivity mapping: a review. *Nat. Resour. Res.* 29, 3415–3424. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09700-9>.
- van Riel, R., Van Gulick, R., 2024. Scientific Reduction. In: Zalta, E.N., Nodelman, U. (Eds.), The Stanford Encyclopedia of Philosophy. <https://plato.stanford.edu/archive/s/spr2024/entries/scientific-reduction/>. accessed 10 July 2024.
- Zhang, C., Han, J., 2021. Data mining and knowledge discovery. In: Shi, W., Goodchild, M.F., Batty, M., Kwan, M.P., Zhang, A. (Eds.), Urban Informatics. The Urban Book Series. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_42.
- Julie E. Bourdeau, Steven E. Zhang, Glen T. Nwaila, Yousef Ghorbani. 2024, Data generation for exploration geochemistry: Past, present and future, *Applied Geochemistry* 172, 106124, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106124>
- Fisher, I., 1988. Blowpipe analysis. In: General Geology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-30844-X_11.
- Smith, D.B., Smith, S.M., Horton, J.D., 2013. History and evaluation of national-scale geochemical data sets for the United States. *Geosci. Front.* 4, 167–183. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.07.002>.
- De Geoffroy, J.G., Wignall, T.K., 1985. Designing Optimal Strategies for Mineral Exploration. Plenum Press, New York.
- Hosseini-Dinani, H., Mokhtari, A.R., Shahrestani, S., De Vivo, B., 2018. Sampling density in regional exploration and environmental geochemical studies: a review. *Nat. Resour. Res.* 28, 967–994. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9431-2>.
- Cohen, D.R., Kelley, D.L., Anand, R., Coker, W.B., 2010. Major advances in exploration geochemistry, 1998–2007. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 10, 3–16. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-21>.
- Winterburn, P.A., Noble, R.R., Lawie, D., 2020. Advances in exploration geochemistry, 2007 to 2017 and beyond. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 20 (2), 157–166. <https://doi.org/10.1144/geochem2019-030>.
- Pirlo, M.C., Giblin, A.M., 2004. Application of groundwater-mineral equilibrium calculations to geochemical exploration for sediment-hosted uranium. observations from the Frome Embayment, South Australia. *Geochem. Explor. Env. A.* 4, 113–127.

19. Plet, C., Noble, R.R., 2023. Soil gases in mineral exploration: a review and the potential for future developments. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 23 (2) <https://doi.org/10.1144/geochem2023-008> geochem2023-008.
20. Cohen, D.R., Shen, X.C., Dunlop, A.C., Rutherford, N.F., 1998. A comparison of selective extraction soil geochemistry and biogeochemistry in the Cobar Area, NSW. *J. Geochem. Explor.* 61 (1–3), 173–190. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00052-6](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00052-6).
21. White, W.M., 2015. *Isotope Geochemistry*. Wiley Blackwell.
22. Hall, G.E.M., Bonham-Carter, G.F., 1998. Selective extractions - foreword. *J. Geochem. Explor.* 61 (1–3) (VII–VIII).
23. de Caritat, P.D., 2022. The national geochemical survey of Australia: review and impact. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 22 (4) <https://doi.org/10.1144/geochem2022-032> geochem2022-032.
24. Lemi`ere, B., Uvarova, Y.A., 2020. New developments in field-portable geochemical techniques and on-site technologies and their place in mineral exploration. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 20 (2), 205–216. <https://doi.org/10.1144/geochem2019-044>.
25. Ma, X., 2023. Data science for geoscience: recent progress and future trends from the perspective of a data life cycle. In: Ma, X., Mookerjee, M., Hsu, L., Hills, D. (Eds.), *Recent Advancement in Geoinformatics and Data Science*, 558. Geological Society of America special paper, pp. 57–69. [https://doi.org/10.1130/2022.2558\(05](https://doi.org/10.1130/2022.2558(05).
26. Grunsky, E.C., 2010. The interpretation of regional geochemical survey data: proceedings of exploration 2007. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 10, 27–74. Grunsky, E.C., de Caritat, P., 2017. Advances in the use of geochemical data for mineral
27. Zuo, R., 2016. A nonlinear controlling function of geological features on magmatic–hydrothermal mineralization. *Sci. Rep.* 6 (1), 27127 <https://doi.org/10.1038/srep27127>.
28. Zuo, R., Wang, J., Xiong, Y., Wang, Z., 2021. The processing methods of geochemical exploration data: past, present, and future. *Appl. Geochem.* 132, 105072. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105072>.
29. Zuo, R., Xiong, Y., Wang, J., Carranza, E.J.M., 2019. Deep learning and its application in geochemical mapping. *Earth Sci. Rev.* 192, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.023>.
30. Liu, Y., Cheng, Q., Carranza, E.J.M., Zhou, K., 2019. Assessment of geochemical anomaly uncertainty through geostatistical simulation and singularity analysis. *Nat. Resour. Res.* 28, 199–212. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9388-1>.
31. Li, C., Ma, T., Shi, J., 2003. Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background. *J. Geochem. Explor.* 77, 167–175. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00276-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00276-5).
32. Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *J. Geochem. Explor.* 51, 109–130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2).
33. Afzal, P., Fadakar, A.Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad, O.N., 2011. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *J. Geochem. Explor.* 18, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005>.
34. He, Y., Zhou, Y., Wen, T., Zhang, S., Huang, F., Zou, X., Ma, X., Zhu, Y., 2022. A review of machine learning in geochemistry and cosmochemistry: method improvements and applications. *J. App. Geochem.* 140, 105273 <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105273>.