



هوش مصنوعی موتور محرک نسل جدید معادن

لطفاً خودتان را معرفی بفرمایید.

الناز بلوری فرد

مهندس کامپیوتر، مدیر فناوری اطلاعات و انتشارات
سازمان نظام مهندسی معدن ایران

مرتضی جلالی فرد

رئیس سازمان نظام مهندسی معدن خراسان جنوبی و
مسئول دفتر افغانستان و عضو کمیته هوش مصنوعی سازمان

جواد طباطبائی

دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی، دارای مدرک دکترای
تخصصی در رشته زمین شناسی زیست محیطی، عضو شورای

مرکزی سازمان نظام مهندسی معدن ایران و کارشناس رسمی
دادگستری در رشته امور معادن

شریف ملک یاری

فارغ التحصیل رشته مهندسی معدن از پلی تکنیک
تهران، دارای حدود ۳۵ سال سابقه کار مستقیم معدنی
اجرائی و مدیریتی و مشاوره‌ای در مجموعه‌های بزرگ معدنی
در سطح کشور هستم که برخی از آنها در زمان تصدی
مدیریت اینجانب به عنوان بهره‌بردار/ صادرکننده نمونه
کشوری و بعضی دیگر به عنوان نمونه استانی شناخته شده‌اند.
در حال حاضر نیز رئیس سازمان نظام مهندسی معدن استان
مرکزی می‌باشم.

به نظر شما هوش مصنوعی چگونه می‌تواند مدل سنتی معدنکاری را به معدنکاری هوشمند و داده‌محور تبدیل کند و مهم‌ترین کاربرد آن در معادن ایران چیست؟

بلوری فرد: هوش مصنوعی با تحلیل حجم عظیمی از داده‌های عملیاتی، زمین‌شناسی و تولید، می‌تواند تصمیم‌گیری در معادن را از حالت تجربی و سنتی به مدل‌های هوشمند و پیش‌بینی‌محور تبدیل کند. در معادن ایران، مهم‌ترین کاربرد فعلی می‌تواند در حوزه پایش ماشین‌آلات، پیش‌بینی خرابی تجهیزات و بهینه‌سازی فرآیند استخراج باشد؛ زیرا توقف تجهیزات معدنی هزینه‌های بسیار سنگینی ایجاد می‌کند.

جلالی فرد: هوش مصنوعی این قابلیت را دارد که بسیاری از تصمیماتی را که تاکنون بر پایه تجربه فردی و بررسی‌های محدود انجام می‌شد، به تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده تبدیل کند. در معدنکاری امروز حجم زیادی از داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی، تصاویر ماهواره‌ای، اطلاعات حفاری و داده‌های تولیدی وجود دارد که تحلیل همزمان آنها برای انسان دشوار است، اما هوش مصنوعی می‌تواند این اطلاعات را در کنار هم قرار داده و الگوهای پنهان را شناسایی کند.

کاربردهای این فناوری در معدن بسیار گسترده است؛ از اکتشاف هوشمند و مدل‌سازی ذخایر گرفته تا بهینه‌سازی استخراج، نگهداری پیش‌بینانه تجهیزات، افزایش ایمنی و مدیریت مصرف انرژی.

به اعتقاد من در شرایط فعلی کشور، مهم‌ترین کاربرد هوش مصنوعی در حوزه اکتشافات معدنی است. ایران از نظر زمین‌شناسی ظرفیت‌های فراوانی دارد، اما هزینه عملیات میدانی و حفاری نیز بسیار بالاست. اگر بتوان پیش از حفاری، با استفاده از تحلیل داده‌های ماهواره‌ای، ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی، مناطق دارای بیشترین احتمال کانی‌سازی را شناسایی کرد، بخش قابل توجهی از ریسک و هزینه اکتشاف کاهش پیدا خواهد کرد.

در سال‌های آینده ترکیب هوش مصنوعی با داده‌های سنجنش از دور، فناوری‌های هابپراسپکتال و روش‌های نوین تلفیق داده‌های اکتشافی می‌تواند دقت شناسایی اهداف معدنی

را به شکل قابل توجهی افزایش دهد و مسیر جدیدی را در اکتشاف مواد معدنی کشور ایجاد کند.

طباطبائی: معدنکاری هوشمند صرفاً به معنی استفاده از کامپیوتر نیست؛ بلکه به معنای ایجاد یک «دوقلوی دیجیتال» (Digital Twin) از کل عملیات است. جایی که هر تصمیمی، از آتشباری تا عیار خوراک ورودی به کارخانه فرآوری، بر اساس تحلیل‌های ریاضی و داده‌های واقعی گرفته می‌شود تا بیشترین بهره‌وری با کمترین آسیب محیط‌زیستی حاصل گردد.

همچنین با توجه به شرایط اقتصادی و نیاز به افزایش بهره‌وری، کاربردهای بهینه‌سازی استخراج و افزایش عیار بازیابی (مخصوصاً در معادن فلزی و سنگ‌آهن) و نگهداری تعمیرات پیش‌بینانه (برای کاهش هزینه‌های توقف و نگهداری ماشین‌آلات سنگین) اولویت‌های بالاتری دارند. این دو حوزه می‌توانند بیشترین بازگشت سرمایه را در کوتاه‌مدت برای معادن ایران به همراه داشته باشند.

در دنیای امروز، معدنکاری دیگر صرفاً یک صنعت مکانیکی و مبتنی بر توان ماشین‌آلات نیست، بلکه به سمتی پیش می‌رود که «داده» به با ارزش‌ترین دارایی یک معدن تبدیل شده است. هوش مصنوعی (AI) نه به عنوان یک ابزار، بلکه به عنوان هسته مرکزی این تحول، مدل سنتی را در چهار لایه اساسی دگرگون می‌کند:

الف- هوشمندسازی اکتشاف و مدل‌سازی ذخایر: در

متدهای قدیمی، اکتشاف متکی بر تفسیرهای انسانی از نقشه‌های زمین‌شناسی و حفاری‌های پرهزینه بود. اما با ورود الگوریتم‌های یادگیری ماشین (Machine Learning)، ما اکنون می‌توانیم الگوهای پنهان در داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی را استخراج کنیم. این یعنی تشخیص دقیق‌تر کانسارها با کمترین تعداد گمانه، که به معنای کاهش مستقیم ریسک سرمایه‌گذاری در فاز صفر پروژه است.

ب- مدیریت هوشمند ناوگان و لجستیک (تحقق

خودکارسازی): یکی از بزرگ‌ترین گلوگاه‌های معدنکاری سنتی، خطای انسانی در هدایت ماشین‌آلات و اتلاف زمان در چرخه بارگیری و باربری است. هوش مصنوعی با بهینه‌سازی

در حوزه اکتشاف، استخراج و فرآوری مواد معدنی، کدام فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را آینده‌دارتر می‌دانید و چرا؟

بلوری فرد: فناوری‌هایی مانند یادگیری ماشین (Machine Learning)، بینایی ماشین (Computer Vision)، پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل داده‌های سنسوری، نقش مهمی در آینده بخش معدن صنایع معدنی خواهند داشت. به‌عنوان مثال، در اکتشاف می‌توان با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ژئوفیزیکی، مناطق امیدبخش را سریع‌تر و دقیق‌تر شناسایی کرد. همچنین در کارخانه‌های فرآوری، هوش مصنوعی می‌تواند راندمان خطوط تولید را به‌صورت لحظه‌ای بهینه کند.

جلالی فرد: به نظر من سه حوزه بیش از سایر بخش‌ها ظرفیت تحول‌آفرینی دارند.

نخست، بینایی ماشین و تحلیل تصاویر معدنی است. این فناوری امکان شناسایی لیتولوژی‌ها و کانی‌ها از روی تصاویر مغزه حفاری، کنترل کیفیت خوراک کارخانه، پایش دیواره معادن روباز و حتی تشخیص ناپایداری‌ها در تونل‌ها و فضا‌های زیرزمینی را فراهم می‌کند. در بسیاری از این موارد، سرعت و دقت تصمیم‌گیری به شکل محسوس‌ی افزایش می‌یابد.

دوم، استفاده از هوش مصنوعی در فرآوری مواد معدنی است. در کارخانه‌های فرآوری صدها متغیر عملیاتی به صورت همزمان بر عملکرد مدار تأثیر می‌گذارند. هوش مصنوعی می‌تواند در بهینه‌سازی خردایش، آسیاکنی، کنترل فلو تاسیون، کاهش مصرف انرژی و آب و افزایش بازیابی نقش مؤثری داشته باشد. با توجه به سهم بالای هزینه‌های انرژی در فرآوری، این حوزه از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

سوم، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق است که به تدریج در حال تبدیل شدن به هسته اصلی معدنکاری هوشمند هستند. این فناوری‌ها می‌توانند با تحلیل داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و تولیدی، در شناسایی مناطق امیدبخش، مدل‌سازی ذخایر و برنامه‌ریزی استخراج به مدیران و کارشناسان کمک کنند.

طباطبائی: آینده‌دارترین فناوری‌ها آن‌هایی هستند که «عدم قطعیت» را در معدن حذف کرده و سیستم را از

مسیرها در لحظه (Real-time Path Planning) و مدیریت ناوگان خودران، باعث می‌شود که تداخل‌های ترافیکی حذف شده و مصرف سوخت به حداقل برسد. در واقع، هوش مصنوعی سیستم را از حالت «واکنشی» به حالت «پیش‌بین» تغییر می‌دهد.

ج- استراتژی نگهداری پیش‌بینانه (Predictive Maintenance): در مدل سنتی، ما یا منتظر خرابی قطعه می‌مانیم یا بر اساس زمان‌بندی‌های تقویمی قطعات را تعویض می‌کنیم که هر دو هزینه سنگینی دارند. اما در پارادایم جدید، با تحلیل داده‌های سنسوری (مانند لرزش، دما و فشار روغن) توسط هوش مصنوعی، خرابی‌ها پیش از وقوع شناسایی می‌شوند. این رویکرد عمر مفید تجهیزات گران‌قیمت معدنی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

د- ایمنی هوشمند و کاهش مداخلات انسانی: محیط معدن ذاتاً خطرناک است. هوش مصنوعی از طریق بینایی ماشین (Computer Vision) می‌تواند به صورت ۲۴ ساعته پایداری دیواره‌ها، لغزش‌های احتمالی و حتی رفتارهای پرخطر پرسنل را پایش کند. این فناوری باعث می‌شود جان انسان‌ها در مناطق پرخطر (مانند استخراج زیرزمینی) با استفاده از ربات‌ها و سیستم‌های کنترل از راه دور حفظ شود.

ملک یاری: مدل سنتی معدنکاری اغلب بر پایه داده‌های پراکنده، حدسیات مهندسی و واکنش‌های پس از وقوع چالش‌ها (Reactive) اداره می‌شود. هوش مصنوعی با اتصال حسگرها و تجمیع داده‌ها، یک «دوقلوی دیجیتال» از معدن ایجاد کرده و رویکرد مدیریتی را به سمت پیش‌بینی‌کننده (Predictive) تغییر می‌دهد.

مهم‌ترین کاربرد در ایران

با توجه به چالش‌های موجود در تأمین قطعات و فرسودگی ماشین‌آلات، پیاده‌سازی سیستم‌های «نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه» بالاترین اولویت را دارد. این سیستم‌ها با تحلیل داده‌های تجهیزات، خرابی‌ها را پیش از وقوع تشخیص داده و از توقف‌های پرهزینه جلوگیری می‌کنند.

مجزا یا با نرم افزارهای ابتدایی تحلیل می کنند. الگوریتم های یادگیری ماشین (Machine Learning) می توانند میلیون ها نقطه داده از ده ها لایه اطلاعاتی مختلف را به صورت همزمان پردازش کنند. این یعنی حفاری اکتشافی دقیقاً در نقطه ای که بیشترین احتمال وجود ماده معدنی را دارد.

۲. بینایی ماشین در تحلیل مغزه های حفاری (Automated Core Logging)

لاگینگ یا ثبت اطلاعات مغزه های به دست آمده از حفاری، فرآیندی است که معمولاً توسط انسان انجام می شود و علاوه بر زمان بردن، به شدت وابسته به قضاوت شخصی و خطای چشمی است. ترکیب دوربین های پیشرفته با الگوریتم های بینایی ماشین (Computer Vision)، می تواند به صورت آنی نوع کانی ها، درصد شکستگی ها (RQD)، آلتراسیون ها و بافت سنگ را با دقت میلی متری اسکن و ثبت کند. این کار سرعت عملیات اکتشاف را ده ها برابر کرده و یک بایگانی دیجیتال، استاندارد و بدون خطا ایجاد می کند.

۳. پهپادهای هوشمند و نقشه برداری ژئوفیزیکی (AI-Powered Drones)

اکتشاف در مناطق صعب العبور یا مناطقی با پوشش گیاهی متراکم همیشه پرهزینه و خطرناک بوده است. پهپادهای مجهز به سنسورهای مغناطیس سنج و لیدار (LiDAR) که توسط هوش مصنوعی هدایت می شوند، می توانند به صورت خودکار در ارتفاع بسیار پایین پرواز کرده و داده های ژئوفیزیکی را با رزولوشنی جمع آوری کنند که با روش های زمینی یا هلیکوپتری غیرممکن است. هوش مصنوعی مستقر در این سیستم ها، در همان لحظه پرواز نويز داده ها را فیلتر کرده و خروجی سه بعدی و تمیز ارائه می دهد.

۴. تحلیل پیش گوینه (Predictive Analytics) برای کاهش ریسک سرمایه گذاری حفاری های اکتشافی که در بسیاری از موارد (به ویژه در ذخایر عمیق) با شکست مواجه می شوند. مدل های هوش مصنوعی با یادگیری از هزاران پروژه اکتشافی موفق و ناموفق قبلی در سراسر جهان، می توانند «احتمال موفقیت» هر نقطه حفاری را پیش بینی کنند.

این فناوری به عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم گیری (Decision Support System) عمل کرده و ریسک هدررفت

حالت واکنشی (حل مشکل بعد از وقوع) به حالت «پیش بین» (جلوگیری از مشکل) تغییر می دهند. این تحول مستقیماً سودآوری و پایداری عملیات را تضمین می کند.

آینده دارترین فناوری های هوش مصنوعی در معدن را می توان به این شکل خلاصه و دسته بندی کرد:

الف- اکتشاف: در حوضه اکتشاف، فناوری تحلیل خودکار داده های ژئوفیزیک، ژئوشیمی و تصاویر ماهواره ای (Deep Learning)، اهمیت آن در کاهش ریسک و هزینه ی حفاری های کور، با شناسایی دقیق ذخایر پنهان در عمق؛ تبدیل داده های پراکنده به نقشه های پتانسیل یابی دقیق می باشد.

ب- استخراج: در حوضه استخراج، فناوری ایجاد مدل دیجیتال و لحظه ای از کل عملیات معدن (Digital Twin)، اهمیت آن در امکان شبیه سازی سناریوهای استخراج قبل از اجرا، پیش بینی پایداری دیواره ها و مدیریت هوشمند ناوگان جهت حذف توقف های ناخواسته می باشد.

ج- فرآوری: در حوضه فرآوری، فناوری بینایی ماشین یعنی آنالیز تصویری سنگ روی نوار نقاله و کنترل خودکار پارامترهای کارخانه (Computer Vision)، اهمیت آن در تشخیص لحظه ای عیار و ابعاد سنگ ورودی، که منجر به افزایش نرخ بازیابی مواد معدنی و کاهش چشمگیر مصرف انرژی و آب می شود.

ملک یاری: فناوری های مبتنی بر هوش مصنوعی در تمامی حلقه های زنجیره ارزش تحول آفرین هستند:

در حوزه اکتشاف: در بخش اکتشاف (Exploration) که پریسک ترین، زمان برترین و در عین حال حیاتی ترین حلقه از زنجیره معدنکاری است، هوش مصنوعی می تواند قواعد بازی را کاملاً تغییر دهد. هدف اصلی در این مرحله، کاهش خطای انسانی، پایین آوردن هزینه های گمانه زنی و افزایش نرخ موفقیت در یافتن ذخایر پنهان است. فناوری های زیر بیشترین پتانسیل را برای آینده اکتشاف دارند:

۱. یادگیری ماشین در تلفیق داده های علوم زمین (Geospatial Data Integration)

در روش های سنتی، زمین شناسان لایه های مختلف داده (ژئوفیزیک، ژئوشیمی، توپوگرافی و دورسنجی) را به صورت

(Dynamic Block Modeling)

در معدنکاری سنتی، مدل سه بعدی و ساختار ذخیره معدنی معمولاً با تأخیرهای طولانی آپدیت می شود و داده ها ایستا هستند. با استفاده از هوش مصنوعی، همزمان که دستگاه های استخراج در حال کار هستند، داده های سنسورهای آنها به صورت خودکار به پایگاه داده مرکزی منتقل شده و دوقلوی دیجیتال معدن در همان لحظه به روزرسانی می شود. این جریان کاری خودکار (Automated Workflow) به مدیران



و مهندسان اجازه می دهد تا تغییرات عیار و هندسه معدن را در لحظه رصد کنند و استراتژی استخراج را بلافاصله با واقعیت روی زمین تطبیق دهند.

در حوزه فرآوری: فرآوری یکی از پرهزینه ترین، پرمصرف ترین و حساس ترین بخش های زنجیره معدنکاری است و فناوری های زیر را به دلیل تأثیر مستقیم و ملموس بر کاهش هزینه ها و افزایش راندمان (Recovery)، بسیار آینده دار و کلیدی هستند:

سرمایه را برای شرکت های اکتشافی به حداقل ممکن می رساند.

در حوزه استخراج: در مرحله استخراج (Extraction) که قلب تپنده و عملیاتی ترین بخش معدن است، تمرکز اصلی فناوری بر روی اتوماسیون جریان های کاری، کاهش هزینه های سربار (سوخت و استهلاک) در عملیات است. فناوری های زیر در این بخش بیشترین پتانسیل تحول آفرینی را دارند:

- تراک های خودران و سیستم های دیسپچینگ پویای ناوگان زیرا در حال حاضر، بخش بزرگی از هزینه های استخراج مربوط به حمل و نقل (Haulage) و مدیریت ماشین آلات است. سیستم های دیسپچینگ هوشمند، ناوگان نیمه خودران و بهینه سازی پویای مسیر ماشین آلات، باعث کاهش چشمگیر مصرف سوخت و افزایش راندمان استخراج می شود.

- بهینه سازی الگوهای حفاری و انفجار (Drill & Blast Optimization): عملیات انفجار یکی از حساس ترین مراحل استخراج است که طراحی سنتی آن اغلب با خطاهای محاسباتی و هدر رفت انرژی همراه است. مدل های یادگیری ماشین می توانند با تحلیل داده های زمین شناسی، مقاومت سنگ و نتایج انفجارهای قبلی، «الگوی دقیق حفاری» و «میزان بهینه مواد منفجره» را برای هر بلوک پیشنهاد دهند. نتیجه اینکار، رسیدن به خردایش ایده آل (که کار بخش فرآوری را بسیار راحت تر می کند)، کاهش لرزش های مخرب و به حداقل رساندن پرتاب سنگ (Flyrock) است. این یعنی اجرای عملیات با بالاترین دقت و کمترین باطله.

- تهویه هوشمند بر اساس تقاضا (Ventilation on Demand): در معادن زیرزمینی، سیستم های تهویه به دلیل اینکه همیشه با حداکثر توان روشن هستند، گاهی تا ۵۰ درصد از کل انرژی معدن را می بلعند.

با ترکیب اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی، سنسورها حضور ماشین آلات و افراد را در تونل های مختلف تشخیص داده و سطح گازهای آلاینده را می سنجند. سیستم هوشمند، شبکه تهویه را دقیقاً در همان نقطه ای که نیاز است و به اندازه مورد نیاز فعال می کند. این مدیریت هوشمندانه جریان هوا، هزینه های انرژی را به شکل خیره کننده ای کاهش می دهد.

- به روزرسانی لحظه ای مدل بلوکی

متغیر (مثل دبی آب، pH، دما و سرعت) را همزمان تحلیل کرده و بهینه‌ترین تنظیمات را به صورت خودکار اعمال کنند.

- هوش مصنوعی می‌تواند بر اساس ویژگی‌های متغیر سنگ ورودی، میزان دقیق مصرف مواد شیمیایی (Reagents) را پیش‌بینی کند. این کار نه تنها هزینه‌های تأمین مواد شیمیایی را کاهش می‌دهد، بلکه درصد بازیابی فلزات ارزشمند را به حداکثر رسانده و آسیب‌های زیست‌محیطی را کم می‌کند.

بسیاری از معادن با چالش ایمنی، حوادث و توقف عملیات مواجه‌اند. هوش مصنوعی چگونه می‌تواند در پیش‌بینی ریسک‌ها، پایش تجهیزات و کاهش حوادث نقش آفرینی کند؟

بلوری فرد: با استفاده از دوربین‌های هوشمند، سنسورها و الگوریتم‌های تحلیل داده می‌توان رفتارهای پرخطر، نشست گاز، افزایش دما یا احتمال ریزش را پیش‌بینی کرد. همچنین سیستم‌های هوشمند قادرند وضعیت اپراتورها و تجهیزات را به‌صورت آنلاین پایش کنند و قبل از وقوع حادثه هشدار دهند. این موضوع به‌ویژه در معادن زیرزمینی اهمیت بسیار بالایی دارد.

جلالی فرد: یکی از مهم‌ترین مزیت‌های هوش مصنوعی، تبدیل رویکرد ایمنی از حالت واکنشی به حالت پیشگیرانه است. یعنی به جای آنکه پس از وقوع حادثه اقدام کنیم، بتوانیم احتمال وقوع خطر را پیش از بروز آن شناسایی کنیم.

در معادن روباز، هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل داده‌های ژئوتکنیکی و اطلاعات پایش شیب‌ها، در شناسایی ناپایداری دیواره‌ها و کاهش ریسک ریزش مؤثر باشد. در معادن زیرزمینی نیز از طریق پایش مستمر گازها، تهویه، دما و رطوبت می‌توان شرایط ناایمن را پیش از رسیدن به مرحله بحرانی تشخیص داد.

در حوزه تجهیزات نیز استفاده از نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه اهمیت زیادی دارد. تحلیل داده‌های عملکردی ماشین‌آلات سنگین می‌تواند خرابی‌های احتمالی را قبل از وقوع پیش‌بینی کرده و از توقف‌های ناخواسته جلوگیری کند. همچنین دوربین‌های هوشمند و سامانه‌های بینایی

- فناوری بینایی ماشین (Computer Vision) در تحلیل دانه‌بندی و عیارسنجی با استفاده از دوربین‌های هوشمند و پردازش تصویر روی نوارهای نقاله، یکی از جذاب‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی است و می‌تواند به صورت آنی ابعاد سنگ‌ها (Particle Size Distribution) و حتی توزیع کانی‌ها را تحلیل کند.

بخش خردایش (سنگ‌شکن‌ها و آسیاب‌ها) بیشترین مصرف انرژی را در کل معدن دارد. بینایی ماشین با تشخیص



دقیق و لحظه‌ای دانه‌بندی خوراک ورودی، از خردایش بیش از حد (Over-grinding) جلوگیری کرده و راندمان انرژی را به شدت بالا می‌برد. همچنین، با تشخیص باطله‌ها پیش از ورود به مدار خردایش، از هدررفت انرژی جلوگیری می‌کند.

- سیستم‌های کنترل پیشرفته (APC) مبتنی بر یادگیری ماشین، مدیریت بخش‌هایی مانند سلول‌های فلو تاسیون (شناورسازی)، تیکنرها و مدار آسیاب‌ها بسیار پیچیده است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند هزاران



ج- کاهش خطای انسانی با دوربین و هشدار هوشمند: با بینایی ماشین چک می‌کند کارگر کلاه/جلیقه/ماسک دارد یا نه و تشخیص می‌دهد کسی وارد محدوده خطر کنار ماشین آلات سنگین شده یا نه و هشدار می‌دهد. حتی می‌تواند خستگی و خواب‌آلودگی راننده را از روی چهره تشخیص دهد تا جلوی تصادف گرفته شود.

هوش مصنوعی سه کار پایش مداوم، تشخیص زودهنگام، و هشدار سریع را انجام می‌دهد؛ همین توانایی باعث می‌شود هم حادثه کمتر شود و هم توقف‌های ناگهانی عملیات کاهش پیدا کند.

ملک یاری: ایمنی یکی از بزرگترین دستاوردهای هوش مصنوعی در معادن است. این نقش آفرینی در سه بخش کلیدی انجام می‌شود:

پایش محیطی: تحلیل آنی داده‌های راداری و ژئوتکنیکی برای پیش‌بینی دقیق ریزش دیواره‌ها و گسیختگی‌ها پیش از وقوع حوادث ناگوار.

ایمنی فردی: (HSE) استفاده از دوربین‌های هوشمند برای تشخیص عدم رعایت پروتکل‌های ایمنی (مثل کلاه و دستکش) یا ورود افراد به مناطق خطرناک.

پایش تجهیزات: همان‌طور که اشاره شد، با رصد ارتعاشات و حرارت دستگاه‌ها، ریسک خرابی‌های ناگهانی و توقف عملیات به حداقل می‌رسد.

ماشین قادرند عدم استفاده از تجهیزات حفاظت فردی، ورود افراد به مناطق پرخطر یا رفتارهای نایمن را تشخیص داده و هشدارهای لازم را صادر کنند.

به نظر من در شرایط فعلی کشور، بیشترین ظرفیت استفاده از هوش مصنوعی در حوزه ایمنی مربوط به پایش پایداری دیواره‌های معادن روباز، کنترل شرایط معادن زیرزمینی و نگهداری پیش‌بینانه تجهیزات معدنی است.

طباطبائی: هوش مصنوعی می‌تواند ایمنی معدن را ساده‌تر و بهتر کند، زودتر از انسان خطر را می‌بیند، زودتر هشدار می‌دهد و کمک می‌کند قبل از حادثه جلوی آن گرفته شود. کاربردهای اصلی آن در این قسمت:

الف- پیش‌بینی ریسک‌های محیطی (ریزش، گاز، خطرات اطراف کارگاه): با داده‌های سنسورها، دوربین‌ها و پهپادها تغییرات دیواره‌ها و سقف را زیر نظر می‌گیرد. اگر ترک، جابه‌جایی یا احتمال ریزش بالا برود، سریع هشدار می‌دهد تا محدوده تخلیه شود. در معادن زیرزمینی می‌تواند گازهای خطرناک و وضعیت تهویه را پایش کند و زودتر اخطار بدهد.

ب- پایش تجهیزات و جلوگیری از خرابی ناگهانی: روی ماشین‌آلات (کامیون، لودر، نوار نقاله، پمپ‌ها) سنسور لرزش، دما، فشار نصب می‌شود. هوش مصنوعی از روی این داده‌ها می‌فهمد دستگاه «غیرعادی» کار می‌کند و قبل از خراب شدن می‌گوید نیاز به سرویس دارد که نتیجه آن کمتر شدن توقف عملیات و کاهش حوادث ناشی از خرابی ناگهانی است.

به اعتقاد شما، مهم‌ترین زیرساخت‌ها و الزامات برای پیاده‌سازی موفق هوش مصنوعی در معادن و صنایع معدنی کشور چیست و چه موانعی در این مسیر وجود دارد؟

بلوری فرد: مهم‌ترین چالش، نبود زیرساخت داده و فرهنگ داده‌محور در بسیاری از معادن است. هوش مصنوعی بدون داده دقیق و مستمر عملاً کارایی ندارد. علاوه بر این، کمبود نیروی متخصص بین‌رشته‌ای که هم دانش معدن داشته باشد و هم علوم داده و هوش مصنوعی را بشناسد، یکی دیگر از موانع جدی توسعه این فناوری در کشور است.

جلالی فرد: بسیاری تصور می‌کنند ورود به حوزه هوش مصنوعی تنها به معنای خرید نرم‌افزار یا استفاده از الگوریتم‌های جدید است، در حالی که موفقیت در این حوزه نیازمند فراهم شدن مجموعه‌ای از زیرساخت‌های فنی، داده‌ای و مدیریتی است.

مهم‌ترین پیش‌نیاز، ایجاد بانک‌های جامع و استاندارد داده‌های معدنی است. بدون داده‌های قابل اعتماد، هیچ سامانه هوشمندی نمی‌تواند عملکرد مناسبی داشته باشد. پس از آن، توسعه حسگرها، سامانه‌های پایش هوشمند، اینترنت اشیا و زیرساخت‌های ارتباطی اهمیت پیدا می‌کند.

موضوع مهم دیگر، سرمایه‌انسانی است. توسعه هوش مصنوعی در معدن نیازمند همکاری متخصصان معدن، زمین‌شناسی، فناوری، فنآوری اطلاعات و علوم داده است. به همین دلیل آموزش و تربیت نیروهای میان‌رشته‌ای باید مورد توجه قرار گیرد.

در مقابل، مهم‌ترین موانع موجود شامل کمبود داده‌های استاندارد، محدودیت برخی زیرساخت‌های دیجیتال، کمبود نیروی متخصص، هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری و گاهی مقاومت در برابر تغییر و پذیرش فناوری‌های جدید است.

با این حال معتقدم صنعت معدن کشور ناگزیر از حرکت در مسیر تحول دیجیتال است و هرچه این حرکت زودتر آغاز شود، مزیت رقابتی بیشتری برای شرکت‌ها و سازمان‌ها ایجاد خواهد کرد.

طباطبائی: برای پیاده‌سازی هوش مصنوعی در معادن

ایران، ما با شرایط خاصی روبرو هستیم که ترکیبی از محدودیت‌های تکنولوژیک، اقتصادی و جغرافیایی است.

الف - پوشش شبکه در مناطق دورافتاده: اکثر معادن بزرگ ایران (مانند معادن سنگ‌آهن سنگان یا معادن مس کرمان) در نقاطی هستند که پوشش اینترنت و شبکه ضعیف است. ایجاد شبکه‌های اختصاصی (LTE/5G) درون سایت معدن، اولین قدم حیاتی است.

ب - دیجیتالی کردن داده‌های تاریخی: ما در ایران حجم عظیمی از داده‌های اکتشافی و استخراجی داریم که هنوز روی کاغذ یا در فایل‌های اکسل غیراستاندارد هستند. تبدیل این‌ها به داده‌های دیجیتال و «تمیز» برای آموزش هوش مصنوعی الزامی است.

ج - بومی‌سازی سخت‌افزارهای واسط: با توجه به تحریم‌ها، ما به بردهای الکترونیکی و سنسورهای نیاز داریم که بتوانند داده‌ها را از ماشین‌آلات قدیمی (که پورت‌های دیجیتال ندارند) استخراج کرده و به سرورها بفرستند.

د - ایجاد مراکز داده ایمن (Data Centers): با توجه به حساسیت داده‌های معدن ملی، نیاز به سرورهای داخلی قدرتمند برای پردازش‌های سنگین هوش مصنوعی وجود دارد تا وابستگی به کلاودهای خارجی حذف شود.

ه - فرسودگی شدید ناوگان حمل‌ونقل: بخش بزرگی از دامپ‌تراک‌ها و بیل‌های مکانیکی در ایران متعلق به دهه‌های گذشته هستند. هوشمندسازی ماشینی که سیستم کنترل الکترونیکی (ECU) ندارد، بسیار دشوار و پرهزینه است.

و - تحریم‌ها و محدودیت‌های نرم‌افزاری: دسترسی به لایسنس پلتفرم‌های بزرگ معدنکاری دنیا (مثل Hexagon یا Micromine) دشوار است. این موضوع ما را مجبور به توسعه نرم‌افزارهای بومی می‌کند که زمان‌بر است.

ز - کمبود نیروی متخصص دو-وجهی: در ایران مهندس معدن زیاد داریم، متخصص IT هم زیاد داریم؛ اما کسی که هر دو حوزه را بلد باشد (یعنی بداند چطور یک الگوریتم هوش مصنوعی را برای چالش‌های انفجار یا فلو تاسیون بومی‌سازی کند) بسیار کمیاب است.

ح - ساختار مدیریتی سنتی و محافظه‌کار: بسیاری از

- محدودیت‌های تحریمی در تأمین حسگرهای پیشرفته و سخت‌افزارهای پردازشی.

اگر بخواهید یک نقشه راه برای ورود سازمان‌ها و شرکت‌های معدنی به عصر هوش مصنوعی ترسیم کنید، اولویت‌های اصلی و اقدامات فوری را چه می‌دانید؟

بلوری فرد: در گام اول باید زیرساخت داده و سیستم‌های دیجیتال در معدن ایجاد شود. سپس لازم است آموزش نیروی انسانی و توسعه تیم‌های تخصصی مشترک بین مهندسان معدن و متخصصان فناوری اطلاعات در اولویت قرار گیرد. پس از آن می‌توان پروژه‌های پایلوت مانند پایش هوشمند ماشین‌آلات یا تحلیل داده‌های اکتشافی را اجرا کرد تا نهادها، سازمان‌ها و اشخاص حقیقی و حقوقی به تدریج به سمت معدنکاری هوشمند حرکت کنند.

جلالی فرد: به نظر من ورود به عصر هوش مصنوعی باید مرحله به مرحله و با نگاه واقع‌بینانه انجام شود. تجربه نشان داده است که بسیاری از پروژه‌های بزرگ تحول دیجیتال به دلیل نبود زیرساخت داده یا عدم آمادگی سازمانی به نتیجه مطلوب نرسیده‌اند.

نخستین گام، ساماندهی و استانداردسازی داده‌های معدنی است. پس از آن باید زیرساخت‌های جمع‌آوری داده، حسگرها، سامانه‌های پایش و ابزارهای دیجیتال توسعه پیدا کنند.

در مرحله بعد، اجرای پروژه‌های پایلوت در حوزه‌هایی مانند اکتشاف، ایمنی، نگهداری تجهیزات و مدیریت انرژی می‌تواند نتایج ملموسی ایجاد کرده و اعتماد مدیران را به این فناوری افزایش دهد.

همزمان باید آموزش مدیران و کارشناسان در حوزه تحلیل داده و هوش مصنوعی در دستور کار قرار گیرد، زیرا موفقیت این تحول بیش از هر چیز به سرمایه انسانی وابسته است.

اگر بخواهیم تنها سه اقدام فوری را پیشنهاد کنیم، عبارت‌اند از:

- ایجاد بانک جامع و استاندارد داده‌های معدنی

- اجرای پروژه‌های پایلوت در حوزه اکتشاف، ایمنی و نگهداری تجهیزات

مدیران معادن دولتی یا بزرگ، ریسک سرمایه‌گذاری روی تکنولوژی‌های نوظهور را نمی‌پذیرند و ترجیح می‌دهند با همان روال سنتی (که خروجی‌اش تضمین شده است) پیش بروند.

ط - نوسانات ارزی: هزینه خرید سنسورها، سرورها و تجهیزات هوشمند به دلار است، در حالی که درآمدهای داخلی ریالی است؛ این موضوع توجیه اقتصادی پروژه‌ها را در میان‌مدت به هم می‌زند.

با توجه به این شرایط، ایران نباید مستقیماً سراغ «کامیون خودران» برود. اولویت‌های ما باید این‌ها باشد:

الف - بهینه‌سازی فرآوری: چون با تجهیزات موجود هم قابل انجام است و سریعاً عیار تولیدی را بالا می‌برد (ارزآوری سریع).

ب - پایش مصرف سوخت و انرژی: به دلیل ناترازی انرژی در کشور، هوش مصنوعی می‌تواند با بهینه‌سازی مسیرها و فرآیندها، هزینه‌های کمرشکن سوخت و برق را مدیریت کند.

ج - ایمنی در معادن زیرزمینی (به‌ویژه زغال‌سنگ): با توجه به حوادث اخیر در معادن زغال‌سنگ ایران، استفاده از سنسورهای ارزان‌قیمت و هوش مصنوعی برای هشدار گاز و ریزش، یک ضرورت اخلاقی و انسانی است.

بزرگترین مانع در ایران «تکنولوژی» نیست، بلکه «فرسودگی تجهیزات» و «نگرش سنتی» است. برای موفقیت، باید از پروژه‌های کوچک و زودبازده در بخش فرآوری شروع کرد تا اعتماد مدیران جلب شود.

ملک یاری: زیرساخت‌ها و الزامات مورد نیاز: مهم‌ترین پیش‌نیازها شامل ایجاد یک شبکه ارتباطی پایدار و امن در سطح معدن (مانند شبکه‌های خصوصی 5G)، ایجاد بستر یکپارچه ذخیره‌سازی داده‌ها (Data Lake) و تربیت نیروهای متخصصی است که هم با مفاهیم معدنکاری و هم با علم داده آشنا باشند.

موانع موجود در کشور:

- مقاومت فرهنگی در برابر تغییر و تمایل به حفظ روش‌های سنتی.

- نبود پایگاه‌های داده استاندارد؛ چرا که بسیاری از اطلاعات همچنان به صورت کاغذی یا پراکنده نگهداری می‌شوند.

آموزش و توانمندسازی مدیران و کارشناسان در حوزه هوش مصنوعی و تحلیل داده

در یک جمله می‌توان گفت: باید از داده شروع کنیم، با پروژه‌های کوچک اما مؤثر پیش برویم و به تدریج به سمت معدن هوشمند یکپارچه حرکت کنیم. سازمان‌هایی که این مسیر را زودتر آغاز کنند، در سال‌های آینده از نظر بهره‌وری، ایمنی و رقابت‌پذیری در موقعیت بهتری قرار خواهند گرفت.

طباطبائی: برای ورود سازمان‌های معدنی ایران به عصر هوش مصنوعی، نمی‌توان مستقیماً به سراغ «خودران کردن» یا «هوش مصنوعی کامل» رفت. نقشه راه باید «گام‌به‌گام» و بر اساس واقعیت‌های اقتصادی و زیرساختی ایران (تحریم‌ها و ناوگان قدیمی) باشد.

نقشه راه پیشنهادی در ۴ فاز کلیدی قابل طرح می‌باشد.

۱- فاز زیرساخت و داده (اولین قدم حیاتی): هوش مصنوعی بدون داده باکیفیت کار نمی‌کند. اقدام فوری در این بخش، خروج از سیستم‌های ثبت دستی است. استقرار یک سیستم جامع و پایگاه داده متمرکز. تمام داده‌های اکتشاف، استخراج و فروش باید از حالت کاغذی و جزیره‌ای خارج شده و در یک «انبار داده» جمع‌آوری شوند.

۲- فاز هوشمندسازی ناوگان و تجهیزات (تعمیرات پیش‌گیرانه): با توجه به قیمت بالای ماشین‌آلات در ایران، حفظ دارایی‌های موجود اولویت اول است. سنسورهای IoT روی قطعات حساس (موتور، گیربکس، سیستم هیدرولیک) دامپ‌تراک‌ها و شاول‌ها نصب شوند.

یکی از کاربردهای LOT می‌تواند استفاده از هوش مصنوعی برای «نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه» باشد. یعنی سیستم قبل از اینکه یک قطعه گران‌قیمت بسوزد، بر اساس لرزش یا دما، هشدار تعویض بدهد.

۳- فاز بهینه‌سازی فرآوری و عیار: بیشترین ارزش افزوده در کارخانه‌های فرآوری (کنسانتره، گندله و ...) نهفته است.

از بینایی ماشین (Computer Vision) روی تسمه‌نقاله‌ها برای تحلیل ابعاد سنگ‌ها (دانه بندی) و تشخیص سنگ‌های باطله استفاده شود.

۴- فاز فرهنگ سازی و آموزش: بزرگترین مانع در ایران،

مقاومت بدنه سنتی معدن در برابر تغییرات تکنولوژیک است.

تشکیل یک «واحد تحول دیجیتال» کوچک اما متخصص که پلی میان مهندسان معدن و زمین شناس و متخصصان داده (Data Scientists) باشد، برگزاری دوره‌های سواد دیجیتال برای اپراتورها و مدیران میانی تا هوش مصنوعی را نه به عنوان «جایگزین»، بلکه به عنوان «ابزار کمکی» ببینند، لازم است.

به طور خلاصه در ایران نباید به دنبال «خرید هوش مصنوعی» بود، بلکه باید به دنبال «ساخت اکوسیستم داده محور» بود. باید در ابتدا باید داده‌ها را جمع کنیم، سپس با پروژه‌های کوچک سودآوری آن را نشان دهیم و در نهایت به سمت خودکارسازی کامل حرکت کنیم.

ملک یاری: تحول دیجیتال باید گام‌به‌گام باشد. نقشه راه پیشنهادی شامل این اولویت‌هاست:

ارزیابی و فرهنگ‌سازی: سنجش سطح بلوغ دیجیتال سازمان و آموزش بدنه مدیریتی.

یکپارچه‌سازی داده‌ها (اقدام فوری): دیجیتالی کردن تمام اسناد، لاگ‌های عملیاتی و داده‌های ماشین‌آلات و ایجاد یک پایگاه داده متمرکز.

پروژه‌های زودبازده: (Quick Wins) اجرای یک پروژه کوچک اما ملموس (مثل هوشمندسازی دیسپچینگ) برای اثبات ارزش فناوری و جلب اعتماد سازمان.

توسعه و مقیاس‌پذیری: تعمیم فناوری‌های موفق به کل زنجیره تامین و تولید.