Forecasting Convergence of Artificial Intelligence and Drilling Technologies Using Link Prediction Method

Mehdi Mohammadi *[1], Masoud Mahanifar [2], Rohaldin Miri [3], mohammad reza sadeghi moghadam [4]

1. Faculty Member, Faculty of Industrial and Technology Management, University of Tehran
2.PhD Candidate, Faculty of Industrial and Technology Management, University of Tehran
3.School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
4.Associate Professor - Faculty of Management - University of Tehran

*. Corresponding Author: mohammadi.mehdi@gmail.com

Received: 31 August 2024 Revised: 23 September 2024 Accepted: 13 October 2024

Abstract

With the emergence of digital technologies and their significant impacts on various industries such as the petroleum industry, their convergence in these industries and forecasting this convergence have always been questioned. This article attempts to forecast the convergence of artificial intelligence and drilling as digital and petroleum technologies. To address this topic, the patent data of these two technological areas were collected from a valid patent database and the co-occurrence network of these two technologies was created. The convergence of the sub-technologies of these two technologies was forecasted by using the link prediction method. Findings indicate that machine learning, computer vision, and robotics, as sub-technologies of artificial intelligence, have a broader application in different parts of drilling operations, and their growth and convergence are anticipated.

Keywords: Technology Forecasting, Technology Convergence, Link Prediction, Artificial Intelligence (AI), Drilling.

Citation: Mohammadi, M., Mahanifar, M., Miri, R., & Sadeghi Moghadam, M. R. (2024). Forecasting Convergence of Artificial Intelligence and Drilling Technologies Using Link Prediction Method, Journal of Technology Development Management, 12(2), 42-71, https://doi.org/10.22104/jtdm.2024.7080.3349

پیش‌بینی همگرایی فناوری‌های هوش مصنوعی و حفاری با استفاده از روش پیش‌بینی پیوند

مهدی محمدی[*1]؛ مسعود ماهانی فر[2]؛ روح الدین میری[3]؛ روح الدین میری[4]

۱. عضو هیئت علمی دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری دانشگاه تهران

۲. دانشجوی دکتری دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری دانشگاه تهران

۳. دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۴. دانشیار- دانشکده مدیریت - دانشگاه تهران

*. نویسنده مسئول: mohammadi.mehdi@gmail.com

دریافت: ۱۰ شهریور ۱۴۰۳ بازنگری: ۰۲ مهر ۱۴۰۳ پذیرش: ۲۱ مهر ۱۴۰۳

چکیده

با ظهور فناوری‌های دیجیتال و تاثیرات چشمگیر آنها در صنایع مختلف همچون صنعت نفت، همواره چگونگی همگرایی آنها در این صنایع و ارائه پیش‌بینی از این همگرایی مورد سوال بوده است. بر همین اساس در این مقاله تلاش شد با انتخاب هوش مصنوعی به عنوان یک فناوری دیجیتال و همینطور حفاری به عنوان یک فناوری نفتی، چگونگی همگرایی این دو فناوری پیش‌بینی شود. برای بررسی این موضوع، داده‌های پتنت این دو حوزه فناورانه از پایگاه داده پتنت معتبر جمع‌آوری شد و شبکه هم‌رخدادی این دو فناوری تشکیل گردید. سپس با استفاده از روش پیش‌بینی پیوند، پیش‌بینی از همگرایی میان زیرفناوری‌های این دو فناوری انجام شد. با بررسی نتایج، مشخص شد که یادگیری ماشین، بینایی ماشین و رباتیک به عنوان زیرفناوری‌های هوش مصنوعی کاربرد گسترده‌تری در بخش‌های مختلف عملیات حفاری داشته و پیش‌بینی می‌شود در این حوزه‌ها شاهد رشد و همگرایی بیشتری باشیم.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی فناوری، همگرایی فناوری، پیش‌بینی پیوند، هوش مصنوعی، حفاری.

مقدمه

صنایع مختلف در طول زمان همیشه با ظهور، رشد، بلوغ و افول فناوری‌های گوناگونی مواجه هستند. صنعت نفت و گاز نیز به عنوان یک صنعت پیشرو همیشه با طیف وسیعی از انواع فناوری‌ها روبرو بوده است. با توجه به اهمیت صنعت نفت در کشور و میزان اثرگذاری آن در اقتصاد و همچنین با عنایت به وابستگی این صنعت به استفاده از انواع فناوری‌ها، شناخت و توجه به این فناوری‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از راه‌های موثر برای شناخت هر چه بیشتر فناوری‌ها، استفاده از روش‌های مختلف پیش‌بینی فناوری است تا با استفاده از آنها بتوان اثرگذاری مناسبی در سیاست‌گذاری‌های فناورانه صنعت ایجاد کرد. همچنین با توجه به پایان‌پذیر بودن سوخت‌های فسیلی همچون نفت و گاز، تمرکز بر بهره‌برداری حداکثری این منابع و تبدیل آنها به فرآورده‌هایی همچون بنزین و محصولات پتروشیمی با ارزش‌افزوده بالا جزو اولویت‌های اساسی می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، به‌کارگیری فناوری‌های روز دنیا در صنعت نفت حیاتی به نظر می‌رسد که می‌تواند تحولی شگرف در صنایع مرتبط به انرژی ایجاد کند. یکی از انواع فناوری‌های نوظهور، نوین و اثرگذار، فناوری‌های دیجیتال می‌باشد که از جمله مهمترین این فناوری‌ها می‌توان از هوش مصنوعی (AI[1])، اینترنت اشیا[2] و زنجیره بلوکی[3] نام برد. شرکت‌های بزرگ نفتی در دنیا در حال استفاده از انواع این فناوری‌ها برای افزایش بهره‌وری در استخراج و بهره‌برداری از منابع نفتی هستند (قطب نمای اقتصاد دیجیتال[4]، ۲۰۱۹). همچنین این نوع فناوری‌ها در دیگر منابع انرژی همچون انرژی خورشیدی، بادی و دیگر انواع انرژی کاربردهای فراوان و گسترده‌ای پیدا کرده است.

روش‌های کیفی و کمی متنوعی در این زمینه وجود دارند که به بررسی و پیش‌بینی فناوری پرداخته و در صنعت نفت نیز پژوهش‌هایی در این زمینه صورت گرفته است که عمدتا با رویکرد کیفی و با استفاده از نظرات خبرگان انجام شده است (بارکر و اسمیث[5]، ۱۹۹۵؛ درو[6]، ۲۰۰۶؛ پروسکوریاکووا و فیلیپوف[7]، ۲۰۱۵). پیش‌بینی فناوری در صنعت نفت، به عنوان صنعتی که در آن فناوری‌ها از حوزه‌های غیرنفتی نیز جذب می‌گردد، اهمیت ویژه‌تری می‌یابد. اما اینکه این فناوری‌ها چگونه در این صنعت اثرگذارند و کشور ما چگونه و با چه برنامه‌ای می‌تواند از این فناوری‌ها در صنعت نفت بهره ببرد جزء سوالاتی است که پاسخ به آن نیاز به بررسی دقیق و مدون‌تری

1. Artificial Intelligence
2. Internet of Things
3. Blockchain
4. Digital Economy Compass
5. Barker & Smith
6. Drew
7. Proskuryakova & Filippov

دارد. یکی از راه‌هایی که می‌توان ظهور و رشد فناوری‌های غیرنفتی در صنعت نفت را در کنار فناوری‌های نفتی مورد بررسی قرار داد، استفاده از رویکرد همگرایی فناوری است. در این رویکرد تلاش می‌شود کاربرد و نقطه تلاقی دو یا چند حوزه فناوری نسبت به هم سنجیده شود. همچنین می‌توان همگرایی فناوری را برای پیش‌بینی مسیر و روند فناوری‌ها مورد استفاده قرار داد که عمدتا اینگونه مطالعات با استفاده از روش‌های کمی و با بهره‌گیری از منابع معتبر فناورانه از جمله پتنت‌ها و مقالات علمی انجام می‌شود (لی[1] و همکاران، ۲۰۲۱؛ پارک و یون[2]، ۲۰۱۸).

با توجه به اهمیت موضوع و همچنین خلأ پژوهشی موجود، این مطالعه در پی پیش‌بینی همگرایی فناوری‌های دیجیتال به عنوان حوزه‌ای غیرنفتی در صنعت نفت می‌باشد. درواقع به دو علت انجام چنین پژوهشی اهمیت دارد و می‌تواند سوالات مهمی را پاسخ دهد که با بررسی ادبیات می‌توان دریافت که کمتر بدان پاسخ داده شده است. جنبه اول این است که معمولا پیش‌بینی با روش‌های کیفی انجام می‌پذیرد که عمدتا نظرات خبرگان در این روش‌ها دریافت می‌شود. اما با توجه به محدودیت‌هایی که در به‌کارگیری خبرگان وجود دارد، نتایج این نوع پژوهش‌ها می‌تواند با سوگیری‌هایی همراه باشد. جنبه دوم نیز از این جهت اهمیت دارد که فناوری‌هایی نظیر فناوری‌های دیجیتال به عنوان فناوری‌هایی غیرنفتی شناخته می‌شوند و احتمال وجود شناخت عمیق از این نوع فناوری‌ها در میان خبرگان صنعت نفت کمتر است. لذا توجه به روش‌های کمی که در آن نیاز چندانی به دریافت نظرات خبرگان وجود ندارد می‌تواند به عنوان یک راهکار مطرح شود (عباس[3] و همکاران، ۲۰۱۴؛ چو و دایم[4]، ۲۰۱۳؛ هالم[5] و همکاران، ۲۰۱۹؛ یوسکویچ[6] و همکاران، ۲۰۲۱).

بر همین اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر پیش‌بینی همگرایی فناوری‌های دیجیتال با فناوری‌های صنعت نفت می‌باشد. برای رسیدن به هدف اصلی پژوهش، اهداف زیر دنبال می‌گردد:

- انتخاب فناوری‌های دیجیتال و فناوری‌های نفتی
- ایجاد شبکه فناوری‌های منتخب دیجیتال و صنعت نفت
- پیش‌بینی الگوهای همگرایی فناوری‌های دیجیتال و فناوری‌های صنعت نفت

1. Lee et al.
2. Park & Yoon
3. Abbas
4. Cho & Daim
5. Haleem
6. Yuskevich

درواقع با این تحقیق، در ابتدا فناوری‌هایی از هر دو دسته دیجیتال و نفتی به عنوان فناوری‌های نمونه برای بررسی در این مطالعه انتخاب می‌گردد. سپس شبکه این فناوری‌های منتخب در کنار یکدیگر تشکیل می‌شود و در پایان نیز پیش‌بینی از همگرایی این فناوری‌ها ارائه می‌گردد.

مبانی نظری

در ابتدا به مرور مختصر دو مفهوم به‌کارگرفته شده در این مقاله که عبارتند از پیش‌بینی فناوری و همگرایی فناوری پرداخته می‌شود و سپس مطالعات گذشته مربوط به موضوع تحقیق فعلی مرور می‌گردد. پیش‌بینی فناوری به فرآیندی سیستماتیک از پیش‌بینی و درک ویژگی‌های آینده، تکامل و اثرات نوآوری‌های فناوری اشاره دارد که شامل تجزیه و تحلیل روندها، الگوها، و پویایی تغییرات فناورانه برای پیش‌بینی جهت، نرخ تغییر و ویژگی‌های فناوری است. هدف از پیش‌بینی فناوری ارائه بینش‌هایی در مورد پتانسیل و پیامدهای فناوری‌های نوظهور است (دایم[1] و همکاران، ۲۰۲۱؛ دی ملو ویانا[2] و همکاران، ۲۰۱۶؛ هوانگ[3] و همکاران، ۲۰۱۹). همگرایی فناوری نیز به ادغام فناوری‌ها، رشته‌ها یا صنایع مختلف برای ایجاد نوآوری‌های، محصولات یا خدمات جدید اشاره دارد. همگرایی فناوری شامل ترکیبی از فناوری‌ها یا حوزه‌های دانشی است که از قبل مجزا بوده و برای ایجاد هم‌افزایی و فرصت‌های جدید به وجود می‌آیند. همگرایی علاوه بر فناوری می‌تواند در صنعت، علم یا بازار نیز رخ دهد. برای سنجش همگرایی روش‌های مختلفی مانند تجزیه و تحلیل پتنت، تحلیل شبکه و تحلیل هم‌طبقه‌بندی استفاده می‌گردد (چوی[4] و همکاران، ۲۰۱۵؛ کفراوغلو[5] و همکاران، ۲۰۲۳؛ لی[6] و همکاران، ۲۰۱۶).

پیشینه پژوهش

پژوهش‌های پیشین که در زمینه همگرایی فناوری انجام شده در سال‌های اخیر با نزدیک شدن فناوری‌های مختلف به یکدیگر و کاربرد پیدا کردن آنها در حوزه‌های جدید افزایش پیدا کرده است. در مطالعه سیک[7] و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی همگرایی صنعت پرداخته شده و چارچوبی برای ارزیابی این نوع همگرایی ارائه شده است. مورد مطالعه در این تحقیق نیز همانند مقاله حاضر هوش مصنوعی و صنعت نفت می‌باشد، با این تفاوت که در این

1. Daim
2. de Mello Vianna
3. Huang
4. Choi
5. Caferoglu
6. Lee
7. Sick

مطالعه به جنبه صنعت توجه شده است. در مقاله لی[1] و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از یادگیری ماشین و بررسی اطلاعات پتنت، پیش‌بینی از وضعیت آتی فناوری‌های داروسازی ارائه شده است. کیم[2] و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی اینترنت اشیا به عنوان یکی دیگر از فناوری‌های دیجیتال از منظر استانداردها و نقش آنها در مسیرهای فناورانه نوظهور، بر اهمیت استانداردسازی در مسیر همگرایی فناوری تاکید کرده‌اند. عیسی[3] و همکاران (۲۰۲۲) در زمینه نقش همگرایانه هوش مصنوعی در شرکت‌های کشاورزی مطالعه‌ای انجام داده‌اند که برخلاف مقاله حاضر در آن از روش‌های کیفی استفاده شده است. مشابه این پژوهش، گروتزماخر[4] و همکاران (۲۰۲۱) نیز با استفاده از روش کیفی دلفی از پیشرفت هوش مصنوعی را پیش‌بینی کرده‌اند. در پژوهش هولاند[5] و همکاران (۲۰۲۴)، همگرایی فناوری‌های دیجیتال و به طور خاص هوش مصنوعی در فناوری‌های مربوط به مهندسی زیست‌شناسی پرداخته شده است که یافته‌های این تحقیق بیشتر معطوف به جنبه‌های پایداری و حکمرانی در نوآوری است. نقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۵) نیز در پژوهش خود به همگرایی توانمندی‌های علمی و فناورانه توجه کرده‌اند که زمینه کاربردی آن سیستم‌های تولید پیچیده هوایی می‌باشد.

همانطور که با بررسی پژوهش‌های پیشین مشخص شد، مطالعات متنوعی در زمینه همگرایی فناوری انجام شده است که هر کدام از جنبه‌های مختلفی این موضوع را مورد تاکید قرار داده‌اند. همچنین با بررسی منابع، مشخص شد بررسی فناوری‌های دیجیتال در صنایع مختلف رو به فزونی است و به طور ویژه اهمیت هوش مصنوعی و زیرشاخه‌های آن از جمله یادگیری ماشین در صنایع مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. روش‌های پیش‌بینی همگرایی نیز که به کار گرفته شده، طیف روش‌های کمی، کیفی و ترکیبی را شامل می‌شود. همچنین جنبه‌های متنوعی از جمله استانداردها، نوآوری، پایداری و حکمرانی مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است. با این حال، همچنان تحقیقی که درباره پیش‌بینی همگرایی فناوری‌های دیجیتال و فناوری‌های صنعت نفت انجام شده باشد و از منظر کمی از طریق داده‌های معتبر پتنت بررسی این دو حوزه انجام گرفته باشد، یافت نشد. بر همین اساس، این مطالعه بر آن است تا این خلأ پژوهشی را با رویکرد پیش‌بینی همگرایی فناوری پاسخ دهد.

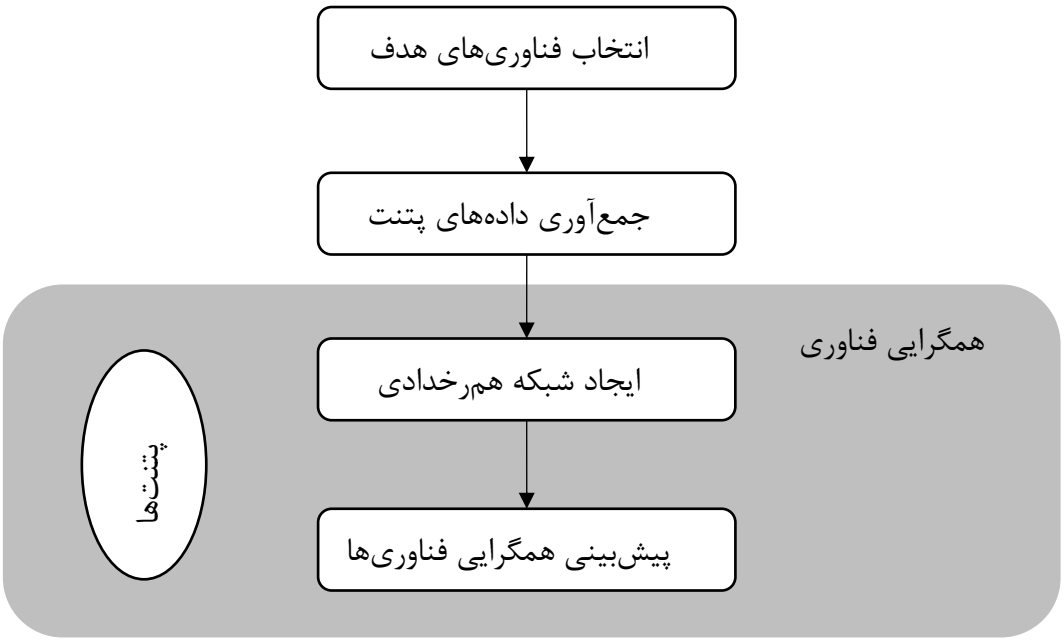
1. Lee
2. Kim
3. Isaa
4. Gruetzemacher
5. Holland

روش پژوهش

منبع اصلی استفاده‌شده در این پژوهش پتنت می‌باشد که به عنوان شاخصی جهت بررسی فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرد (ژونگ[۱] و همکاران، ۲۰۲۳؛ پارک[۲] و جون[۳]، ۲۰۲۲). بر همین اساس، تحقیقات کتابخانه‌ای بایگانی به عنوان روش جمع‌آوری اطلاعات در این تحقیق استفاده شده است. تحقیقات کتابخانه‌ای بایگانی را می‌توان در تحقیقات با پتنت به عنوان منبع داده به روش‌های مختلفی از جمله تجزیه و تحلیل پتنت، زمینه تاریخی، تجزیه و تحلیل تطبیقی، تحقیقات مالکیت فکری، و مثلثی‌سازی داده‌ها استفاده کرد (پاستوا[۴] و همکاران، ۲۰۲۰).

با توجه به اینکه در این پژوهش از مدل‌سازی آماری ریاضی استفاده شده است، روش‌شناسی پژوهش تحلیلی ریاضی مورد استفاده قرار گرفت. هدف این نوع روش‌شناسی توسعه روابط پیچیده میان مفاهیم نزدیک به هم از طریق ایجاد روابط ریاضی و آماری است تا بتوان چگونگی رفتار مدل‌ها را در شرایط گوناگون مورد مطالعه قرار دهد (واکر[۵]، ۱۹۹۸). با توجه به اینکه هدف پژوهش پیش‌بینی همگرایی فناوری است، روش تجزیه و تحلیل جهت رسیدن به این پیش‌بینی، پیش‌بینی پیوند[۶] انتخاب شد. هدف از پیش‌بینی پیوند، شناسایی پیوندهای بالقوه‌ای است که احتمالاً براساس ساختار شبکه موجود و اطلاعات موجود در شبکه شکل می‌گیرند و می‌توان آن را در انواع مختلف شبکه‌ها از جمله شبکه‌های اجتماعی، شبکه‌های بیولوژیکی، شبکه‌های استنادی و موارد دیگر اعمال کرد (یانگ و همکاران[۷]، ۲۰۱۴). مطالعه حاضر در چهار مرحله انجام گرفت که در شکل ۱ این مراحل به تصویر کشیده شده است.

1. Zhong
2. Park
3. Jun
4. Pastva
5. Wacker
6. Link Prediction
7. Yang et al.



شکل ۱: مراحل انجام پژوهش (منبع: ارائه شده توسط نویسندگان)

- مرحله اول: انتخاب فناوری‌های هدف

هدف این پژوهش پیش‌بینی همگرایی فناوری‌ها در دو دسته فناوری‌های دیجیتال و فناوری‌های صنعت نفت می‌باشد و از آنجایی که این دو دسته فناوری هر کدام طیف وسیعی از فناوری‌ها را دربرمی‌گیرند، دو نوع فناوری خاص جهت بررسی انتخاب شد. فناوری‌های دیجیتال شامل طیفی از فناوری‌های می‌شوند که به مرور در صنایع گوناگون کاربرد بیشتری می‌یابند. از جمله این فناوری‌ها می‌توان به هوش مصنوعی، زنجیره بلوکی یا بلاکچین، اینترنت اشیا، همزادهای دوقلو[1] و امنیت سایبری[2] اشاره کرد. از طرفی صنعت نفت همواره با فرایندهای متنوع و بسیاری همراه بوده است که معمولا با عملیات اکتشاف آغاز شده و با فرایندهای دیگری همچون عملیات حفاری، مهندسی مخزن، عملیات‌های مرتبط با چاه، انتقال و همینطور پخش و پالایش ادامه می‌یابد. در این بین عملیات حفاری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است زیرا هر چه زمان این فرایند کوتاه‌تر شود، به طور مستقیم بر عواید مالی حاصل از استحصال نفت اثر گذاشته و اقتصاد پروژه به طور معناداری تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد هوش مصنوعی که هم قابلیت‌های بهبوددهنده بسیار قوی داشته و هم با استفاده از آن می‌توان سرعت انجام فرایندها را بالا برد، در این پژوهش به این فناوری توجه شد. بنابراین، از بین

1. Digital Twins
2. Cybersecurity

فناوری‌های دیجیتال فناوری هوش مصنوعی و از میان فناوری‌های نفتی نیز فناوری حفاری انتخاب گردید. لازم به ذکر است که هر کدام از این دو فناوری شامل شاخه‌های مختلفی می‌شوند که در ادامه مقاله این شاخه‌ها یا زیرفناوری‌ها معرفی شده است.

فناوری حفاری در صنعت نفت به عنوان یکی از کلیدی‌ترین فرآیندهای نفتی شناخته می‌شود زیرا دسترسی به ذخایر هیدروکربنی در گرو به‌کارگیری آن است. پیشرفت‌های زیادی در این فناوری صورت گرفته که به استخراج کارآمد و پایدار منابع نفت و گاز کمک می‌کند. همچنین حفاری باید در سریع‌ترین زمان ممکن انجام شود تا بتواند منجر به مزایای اقتصادی مختلفی در زنجیره ارزش گردد. از جمله این مزایا که از طریق بهینه‌سازی فرآیند حفاری بدست می‌آید می‌توان به کارایی هزینه، افزایش نرخ تولید، کاهش زمان غیرمولد (NPT[1]) و بهبود اقتصاد پروژه اشاره کرد که همواره مورد توجه شرکت‌های بزرگی نفتی است (ملکی[2] و روزیلو[3]، ۲۰۱۹).

از سوی دیگر هوش مصنوعی در صنایع مختلف اهمیت فراوان دارد و صنایع را از جنبه‌های گوناگونی از جمله تجزیه و تحلیل داده‌ها، شخصی‌سازی، پیش‌بینی، مدیریت ایمنی و ریسک، نوآوری و بهینه‌سازی فرآیند تحت تاثیر خود قرار داده است. این کاربردها در صنعت نفت و گاز نیز پتانسیل بالایی را برای افزایش کارآیی، ایمنی و تصمیم‌گیری بهینه دارد که در بخش‌های مختلفی همچون حفاری و اکتشاف، ایمنی، تعمیرات و نگهداری دارایی‌ها، بهره‌وری انرژی و پایداری، بهینه‌سازی تولید و مدلسازی مخزن به طور محسوسی قابل مشاهده است (حسنی و همکاران[4]، ۲۰۱۷).

- مرحله دوم: جمع‌آوری داده‌های پتنت

همانطور که قبلا نیز اشاره شد، از پتنت به عنوان منبع اصلی داده در این تحقیق استفاده شده است. پتنت یک سند قانونی است که توسط یک مقام دولتی اعطا می‌شود و حقوق انحصاری را برای مخترع یا واگذارنده حق اختراع برای مدت زمان مشخصی فراهم می‌کند. پتنت این حق را به مالک اعطا می‌کند که دیگران را از ساخت، استفاده، فروش یا وارد کردن اختراع ثبت شده بدون اجازه دیگران محروم کند. هر پتنت شامل چند بخش اصلی است که عبارتند از عنوان، چکیده، پیشینه/مقدمه، توضیحات، ادعاها، نقشه‌ها، مخترع(ها) و اطلاعات بایگانی و انتشار. همچنین هر پتنت با دسته‌ها یا کلاس‌های خاص پتنت طبقه‌بندی می‌شود که مهمترین این طبقه‌بندی‌ها IPC[5]

1. Non-productive Time
2. Maleki
3. Rosiello
4. Hassani
5. International Patent Classification

و CPC[1] می‌باشد. این کدها، چارچوب‌های استانداردشده‌ای را برای سازماندهی و بازیابی اطلاعات پتنت، تسهیل جستجوی پتنت و تجزیه و تحلیل روندهای فناوری ارائه می‌دهند. IPC به طور گسترده در سطح جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که CPC یک طرح طبقه‌بندی دقیق‌تر و دانه‌بندی‌شده‌تر، به ویژه در حوزه‌های فناوری نوظهور ارائه می‌دهد. در این پژوهش از IPC به منظور جمع‌آوری پتنت‌های مرتبط برای هر حوزه فناوری استفاده شده است. درواقع حوزه‌های فناوری توسط برخی IPCها تعیین شده و پتنت‌های این IPCهای تعریف شده برای هر حوزه فناوری جمع‌آوری شد. برای جستجو و جمع‌آوری پتنت‌ها پایگاه‌های اطلاعاتی مختلفی وجود دارد که از بین آنها پایگاه داده اوربیت[2] با توجه به گستردگی داده‌های پتنت ثبت‌شده در آن در این تحقیق انتخاب شد. جستجوی پتنتی که در این پایگاه داده صورت گرفت به لحاظ زمانی پتنت‌های ثبت‌شده از سال ۱۸۷۰ میلادی تا سال ۲۰۲۳ را شامل می‌شود.

گردآوری داده‌های پتنت در این مقاله بدین صورت انجام گرفت که در ابتدا دسته‌های فناورانه هر کدام از حوزه‌های فناورانه هوش مصنوعی و حفاری بدست آمد. برای هوش مصنوعی یادگیری ماشین، بینایی ماشین، پردازش گفتار، پردازش زبان طبیعی، رباتیک و منطق فازی و برای حفاری مهندسی حفاری، خدمات فنی حفاری، بهداشت، ایمنی و محیط زیست (HSE[3])، کالا و مواد در حفاری و ارتباطات و فناوری اطلاعات (ICT[4]) به عنوان دسته‌های فناورانه یا زیرفناوری‌ها تعیین گردید. سپس برای هر کدام از این زیرفناوری‌ها با استفاده از نظر خبرگان در هر یک از این دو حوزه، کلیدواژه‌های مشخصی استخراج شد و این کلیدواژه‌ها درون کوئری‌های[5] جداگانه مبتنی بر مدل کوئری‌نویسی در پایگاه داده اوربیت گنجانده شد. برای نمونه، برای استخراج اولیه پتنت‌های مربوط به رباتیک از رشته[6] زیر استفاده شد که یکی از ساده‌ترین کوئری‌های مورد استفاده بود، در حالی که بقیه کوئری‌های استفاده شده به دلیل پیچیدگی‌های لغوی و کاربردی مربوط به کلیدواژه‌های آن دسته‌ها، نیازمند تشکیل رشته‌های بزرگتر و پیچیده‌تر بود:

- (robot+ OR mechatron+) /ICLM

این کوئری‌ها جستجو را در میان ادعاهای هر پتنت انجام دادند. در جستجوی اولیه براساس این کوئری‌ها، پتنت‌های هر دسته استخراج شد و نتایج براساس فراوانی IPCها در هر دسته مرتب گردید. در ادامه با توجه به

1. Cooperative Patent Classification
2. orbit.com
3. Health, Safety, and Environment
4. Information and Communication Technology
5. Queries
6. String

فراوانی IPCهای هر دسته و بررسی IPCها به لحاظ موضوعی و فراگیری آن در موضوع موردنظر هر دسته، IPCهای مشخصی برای هر دسته فناورانه یا زیرفناوری انتخاب گردید. درواقع در این مرحله از جستجو تلاش شد با توجه به کلیدواژه‌های تخصصی هر دسته فناوری، IPCهایی که آن دسته را شامل می‌شوند استخراج گردد. به عنوان مثال، بیش از شانزده هزار IPC برای زیرفناوری رباتیک استخراج شد که پس از مرتب کردن آنها براساس فراوانی و بررسی تک به تک IPCهای با فراوانی بالا و اطمینان از مرتبط بودن آنها با زیرفناوری رباتیک، چند IPC به عنوان IPCهای دربرگیرنده زیرفناوری رباتیک انتخاب گردید. در مرحله بعدی که جستجوی نهایی صورت گرفت، کلیه IPCهای منتخب و بدست آمده در جستجوی اولیه به صورت جداگانه در پایگاه داده اوربیت مورد جستجو قرار گرفت و داده‌های پتنت کلیه این دسته‌ها استخراج گردید. درواقع جستجوی اولیه با هدف رسیدن به IPCهای دربرگیرنده زیرفناوری‌ها انجام شد و پس از حصول اطمینان از انتخاب IPCهای درست و مرتبط، جستجوی ثانویه برای احصا کردن کلیه پتنت‌های ذیل هر IPC صورت گرفت. دسته‌بندی نهایی به همراه تعداد پتنت‌های هر کدام از زیرفناوری‌ها در جدول ۱ و جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۱: دسته‌بندی فناوری‌ها و IPCهای حفاری (منبع: نتایج پژوهش)

حوزه فناوری	زیرفناوری	IPC	تعداد پتنت
حفاری	مهندسی حفاری	E21B C09K-008	۲۵۳۶۸۳
	خدمات فنی حفاری	B21B-019/04 B23B-041/00 E02D-003/12 E02D-005/80 G01N-001/08	۹۵۱۳۵
	کالا و مواد در حفاری	B23B-039/00 B23B-039/14 B23B-039/16 B23B-041/00 B23B-041/02 B23B-045/00 B23B-045/02 B23B-047/00 B23B-047/28 B23B-051 B27C-003 B28D-001/14 C04B-028/04	۱۸۳۸۵۲
	ارتباطات و فناوری اطلاعات (ICT)	G01V-001/00	۷۴۷۳۱

حوزه فناوری	زیرفناوری	IPC	تعداد پتنت
		G01V-001/28 G01V-001/30 G09B-009/00 G09B-025/02	
	بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست (HSE)	A62C-037/00	۱۲۳۶۰

جدول ۲: دسته‌بندی فناوری‌ها و IPCهای هوش مصنوعی (منبع: نتایج پژوهش)

حوزه فناوری	زیرفناوری	IPC	تعداد پتنت
هوش مصنوعی	رباتیک	A61B-34 B25J-005 B25J-009	۱۸۴۲۷۰
	یادگیری ماشین	G06N-003/02 G06N-003/08 G06N-099/00 G06N-005/02 G06N-007/04 G06N-007/00 G06F-018/00 G06F-018/40	۲۴۷۵۳۳
	بینایی ماشین	G06T-001/20 G06T-007/00 G06T-009/00 G06T-019/20 G06T-007/10 G06T-003/40 G06T-007/215 G06T-007/246 G06F-018/00 G06F-018/40	۲۷۳۴۹۲
	پردازش زبان طبیعی	G06F-016/20 G06F-016/30 G06F-016/93 G06F-018/00 G06F-040 G06F-018/40	۱۰۲۵۷۰
	پردازش گفتار	G10L-013/00 G10L-015/00 G10L-017/00 G10L-025/00 G10L-099/00	۵۰۱۰۴

حوزه فناوری	زیرفناوری	IPC	تعداد پتنت
	منطق فازی	G06N-007/02	۳۳۱۰

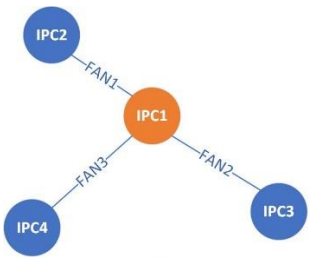
- مرحله سوم: ایجاد شبکه هم‌رخدادی

در تحقیق حاضر جهت بررسی وضعیت پتنت‌ها در حوزه‌های فناورانه نسبت به یکدیگر، شبکه هم‌رخدادی تشکیل شد تا با استفاده از آن بتوان در مرحله بعدی از طریق پیش‌بینی پیوند، همگرایی فناوری‌ها را در هر دسته از IPCها و زیرفناوری‌های متناظر آن پیش‌بینی نمود. شبکه هم‌رخدادی نمایش شبکه‌ای از الگوها یا روابط همزمان بین موجودیت‌ها یا متغیرهای مختلف است که براساس فراوانی یا قدرت وقوع همزمان بین جفت موجودیت‌ها یا متغیرها ساخته می‌شود. در زمینه همگرایی فناوری، شبکه‌های هم‌رخدادی می‌توانند ارتباطات و روابط بین فناوری‌های مختلف یا حوزه‌های فناوری را آشکار کنند. با تجزیه و تحلیل الگوهای هم‌رخدادی فناوری‌ها در داده‌های پتنت یا سایر منابع، محققان می‌توانند همگرایی فناوری‌ها و ظهور زمینه‌های بین رشته‌ای جدید را شناسایی کنند (جونگ و همکاران[1]، ۲۰۲۱). الگوهای مشاهده شده در شبکه‌های هم‌رخدادی می‌توانند همگرایی فناوری را به روش‌های مختلفی از جمله خوشه‌بندی و پیش‌بینی پیوند نشان دهند (چوی[2]، ۲۰۲۲) که در این مقاله از پیش‌بینی پیوند استفاده شده است.

در همین راستا با توجه به اینکه پیش‌بینی IPCهایی که در آینده همگرا می‌شوند نیازمند تشکیل شبکه متشکل از پتنت‌های موردنظر است، این شبکه در قالب گرافی ایجاد شد. گراف‌ها از رأس‌ها و یال‌هایی تشکیل شده‌اند که در پژوهش حاضر برای هر رأس کد IPC و برای هر یال کد یکتای هر پتنت درنظر گرفته شد. با توجه به اینکه داده‌ها از پایگاه داده اوربیت دریافت شده است و این پایگاه داده برای هر پتنت کد یکتایی درنظر گرفته است، این کد یکتا با نام FAN[3] به عنوان یال درنظر گرفته می‌شود که در پایگاه داده اوربیت، هر پتنت با این کد یکتا شناخته می‌شود. درواقع هر FAN نشانگر یک پتنت می‌باشد که می‌تواند شامل یک یا چند IPC باشد. زمانی که یک پتنت شامل چند IPC باشد یا درواقع وجود چند کد IPC همزمان در یک پتنت رخ داده باشد، هم‌رخدادی آن کدهای IPC صورت گرفته است. در این حالت، اگر IPCها از دو زیرفناوری یا دسته فناورانه متفاوت باشند، همگرایی آن دو زیرفناوری رخ داده است که هدف این مطالعه نیز پیش‌بینی این همگرایی‌ها می‌باشد و در مرحله

1. Jung et al.
2. Choi et al.
3. Questel Unique Family ID (FAN)

بعدی چگونگی انجام این پیش‌بینی توضیح داده شده است. برای نمونه اگر در پتنت شماره یک (FAN1)، دو IPC با نام‌های IPC1 و IPC2 وجود داشته باشد یا به عبارتی این دو IPC همزمان در پتنت FAN1 رخ داده باشد، می‌توان گفت که در پتنت شماره یک میان این دو IPC، هم‌رخدادی اتفاق افتاده است. حال اگر فرض کنیم IPC1 مربوط به هوش مصنوعی و IPC2 مربوط به حفاری باشد، می‌توان گفت در این پتنت خاص، همگرایی میان هوش مصنوعی و حفاری رخ داده است. این روند برای دیگر پتنت‌ها نیز قابل بررسی است که برای این منظور، گرافی با استفاده از IPCها به عنوان رأس و FANها به عنوان یال اتصال دهنده این رأس‌ها ایجاد شده و بدین ترتیب رأس‌های همسایه (یا رأس‌های مجاور هر رأس) مشخص گردید. به عنوان نمونه برای درک بهتر، در شکل ۲ رأس‌های مجاور رأس IPC1 و نحوه اتصال آنها به این رأس از طریق سه یال FAN1، FAN2 و FAN3 نشان داده شده است.



شکل ۲: راهنمای نحوه اتصال تشکیل گراف با رأس‌ها و یال‌های آن (منبع: ارائه شده توسط نویسندگان)

- مرحله چهارم: پیش‌بینی همگرایی فناوری‌ها

همانطور که بیان شد، در این تحقیق جهت پیش‌بینی الگوهای همگرایی فناوری‌های آتی از روش پیش‌بینی پیوند استفاده می‌شود. پیش‌بینی پیوند، روشی در تحلیل شبکه است که هدف آن پیش‌بینی وجود یا احتمال پیوندهای آینده بین رأس‌ها در یک شبکه به شکل گراف است، به ویژه در شرایطی که شبکه ناقص یا در حال تکامل است، و نیاز به گسترش یال‌های گمشده وجود دارد. روش‌های پیش‌بینی پیوند از تکنیک‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای تخمین احتمال پیوند بین دو رأس استفاده می‌کنند. این روش‌ها اغلب از توپولوژی شبکه، ویژگی‌های رأس‌های گراف و سایر اطلاعات مرتبط برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند. رویکردهای رایج شامل روش‌های مبتنی بر شباهت، تکنیک‌های تعبیه گراف، الگوریتم‌های یادگیری تحت نظارت و مدل‌های احتمالی است (بوته لورنزو و

همکاران[1]، ۲۰۱۸). کاربردهای پیش‌بینی پیوند متنوع است و شامل سیستم‌های پیشنهاددهنده، تشخیص تقلب، تجزیه و تحلیل شبکه‌های اجتماعی، شبکه‌های بیولوژیکی و تحلیل تکامل شبکه می‌شود.

این روش می‌تواند برای پیش‌بینی همگرایی فناوری نیز استفاده شود. در این راستا، در پیش‌بینی پیوند شاخص‌های مختلفی از جمله ضریب ژاکارد[2]، شاخص آدامیک آدار[3]، همسایه‌های مجاور[4]، شاخص کتز[5] و شاخص تخصیص منبع[6] مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این پژوهش از ضریب ژاکارد و امتیاز مشابهت آدامیک آدار استفاده شده است که چگونگی محاسبه این دو شاخص در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳: دو شاخص مورد استفاده برای پیش‌بینی پیوند (بوته لورنزو و همکاران، ۲۰۱۸)

نام شاخص	تعریف	فرمول محاسبه
شاخص ژاکارد	محاسبه نسبت همسایه‌های مجاور به کل تعداد همسایه‌های یکتا	$JC(u,v) = \frac{\lvert\Gamma(u)\cap\Gamma(v)\rvert}{\lvert\Gamma(u)\cup\Gamma(v)\rvert}$
شاخص آدامیک آدار	محاسبه وزن همسایه‌های مجاور از طریق لگاریتم معکوس درجات آنها	$AA(u,v) = \sum_{w\in\Gamma(u)\cap\Gamma(v)} \frac{1}{\log\lvert\Gamma(w)\rvert}$

پس از تشکیل شبکه هم‌رخدادی یا گراف موردنظر برای تحلیل، در پیش‌بینی پیوند می‌توان با استفاده از ویژگی‌های خاص گراف تشکیل شده به محاسبه ضرایبی همچون ضرایب ژاکارد و آدامیک آدار پرداخت. هر چه این ضرایب بزرگتر باشد، نشان‌دهنده احتمال قوی‌تر ایجاد پیوند میان رأس‌های گراف است. با توجه به اینکه این رئوس در پژوهش حاضر IPCها می‌باشند، می‌توان نتیجه گرفت که هر چه ضرایب بدست آمده از شاخص‌های ژاکارد و آدامیک آدار بالاتر باشد، همگرایی میان زوج IPCهای موردبررسی هوش مصنوعی و حفاری قوی‌تر می‌باشد.

یافته‌ها

همانطور که در بخش‌های قبلی مقاله اشاره شد، هدف از انجام این پژوهش پیش‌بینی همگرایی فناوری دو حوزه فناوری‌های دیجیتال و فناوری‌های نفتی است که دو فناوری هوش مصنوعی و حفاری از این دو بخش به عنوان نمونه جهت بررسی انتخاب شده‌اند. پس از جمع‌آوری داده‌های پتنت، شبکه هم‌رخدادی با درنظر گرفتن IPCها

1. Bote-Lorenzo et al.
2. Jaccard Coefficient (JC)
3. Adamic-Adar Index (AA)
4. Common Neighbors (CN)
5. Katz Index
6. Resource Allocation Index (RA)

و FANهای پتنت‌های استخراج شده به ترتیب به عنوان رأس‌ها و یال‌های گراف تشکیل شد. سپس با روش پیش‌بینی پیوند، احتمال ایجاد همگرایی میان زیرفناوری‌های هر کدام از دو فناوری هوش مصنوعی و حفاری مورد بررسی قرار گرفت.

برای انجام پیش‌بینی پیوند، ابتدا ضریب ژاکارد محاسبه شد و سپس برای اطمینان از نتایج بدست آمده و همچنین مقایسه آن، امتیاز مشابهت آدامیک آدار محاسبه گردید. در جدول ۴ ضرایب ژاکارد بالای ۰.۶۵ برای زوج IPCهای حفاری-هوش مصنوعی نشان داده شده است.

جدول ۴: ضریب ژاکارد برای زوج IPCهای حفاری-هوش مصنوعی (منبع: نتایج پژوهش)

IPCهای حفاری	IPCهای هوش مصنوعی	ضریب ژاکارد	IPCهای حفاری	IPCهای هوش مصنوعی	ضریب ژاکارد
G09B-009/00	G06T-019/20	۰,۷۷۱٤۲۸٥۷۱٤	G09B-009/00	G06T-009/00	۰,٦٨٥۷۱٤۲٨٥۷
E21B	B25J-009	۰,۷٦۹۲۳۰۷٦۹۲	G09B-009/00	G06N-005/02	۰,٦٨٤۲۱۰٥۲٦۳
G09B-009/00	G06T-003/40	۰,۷٥	G09B-009/00	G06N-003/02	۰,٦۷٥
G09B-009/00	G06N-099/00	۰,۷۲۹۷۲۹۷۲۹۷	G01V-001/28	G06N-099/00	۰,٦٦٦٦٦٦٦٦٦۷
G09B-009/00	G06F-040	۰,۷۱۷۹٤۸۷۱۷۹	G01V-001/28	G06N-005/02	۰,٦٦٦٦٦٦٦٦٦۷
E21B	G06T-007/00	۰,۷۱٦۹۸۱۱۳۲۱	E21B	B25J-005	۰,٦٦
G09B-009/00	G06T-001/20	۰,۷۱٤۲۸٥۷۱٤۳	G09B-009/00	G06N-003/08	۰,٦٥۹۰۹۰۹۰۹۱
G09B-009/00	G06N-007/00	۰,۷۱۰٥۲٦۳۱٥۸	G01V-001/28	G06N-003/02	۰,٦٥۷۸۹٤۷۳٦۸
G01V-001/00	G06T-001/20	۰,۷۰٥۸۸۲۳٥۲۹	G09B-009/00	G10L-015/00	۰,٦٥۷۸۹٤۷۳٦۸
G09B-009/00	G06T-007/246	۰,۷۰۲۷۰۲۷۰۲۷	G09B-009/00	G06T-007/10	۰,٦٥۷۱٤۲٨٥۷۱
G09B-009/00	G06N-007/02	۰,۷۰۲۷۰۲۷۰۲۷	G01V-001/28	G10L-013/00	۰,٦٥٦۲٥

با توجه به تعداد بالای زوج IPCها، تنها به ارائه نتایج ضرایب بالای ۰.۶۵ اکتفا شد و این مقدار به عنوان آستانه مورد قبول زوج IPCهایی که برای آنها پیش‌بینی همگرایی انجام می‌شود درنظر گرفته می‌شود. به طور کلی ضریب ژاکارد عددی بین صفر و یک می‌باشد که هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد احتمال پیوند میان رأس‌ها افزایش می‌یابد و به طور معمول عددی بین ۰.۶ تا ۰.۷ به عنوان آستانه مورد قبول درنظر گرفته می‌شود.

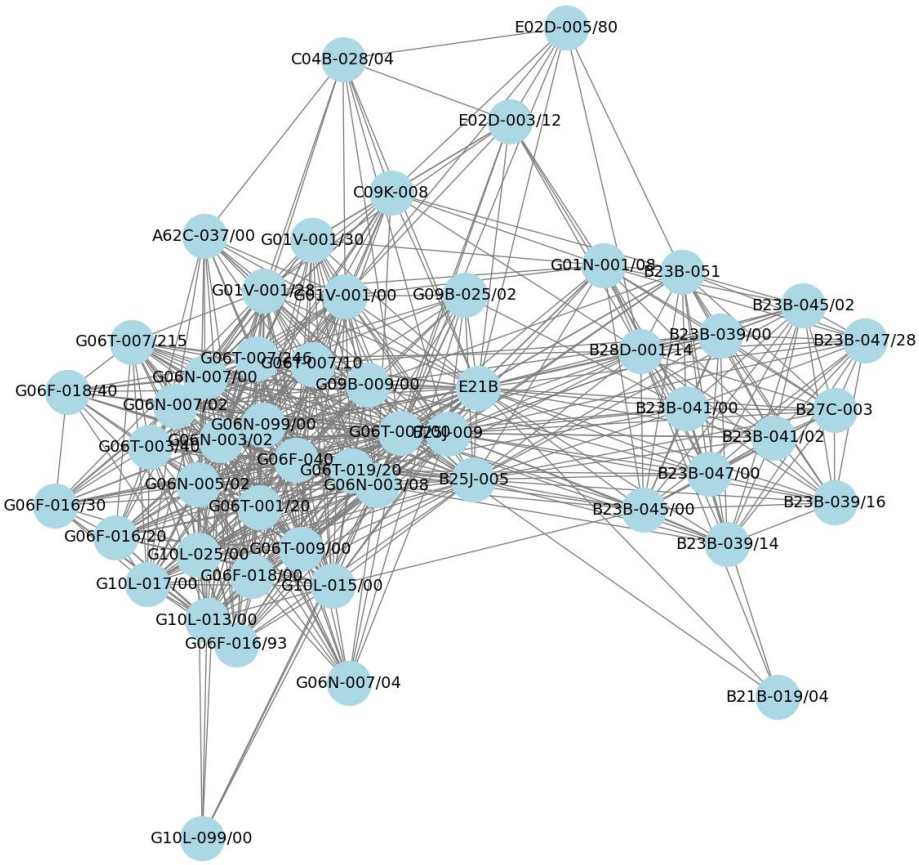
در جدول ۵ نیز امتیاز آدامیک آدار برای زوج IPCهای حفاری-هوش مصنوعی با مقدار بیش از ۶ نمایش داده شده است. هر چه امتیاز آدامیک آدار بالاتر باشد احتمال پیوند میان رأس‌ها بالاتر می‌رود و از آنجایی که از این روش برای تایید ضرایب ژاکارد محاسبه و مقایسه نتایج استفاده شد، صرفا نتایج بالاتر از ۶ گزارش شده است.

جدول ۵: امتیاز آدامیک آدار برای زوج IPCهای حفاری-هوش مصنوعی (منبع: نتایج پژوهش)

IPCهای حفاری	IPCهای هوش مصنوعی	امتیاز آدامیک آدار	IPCهای حفاری	IPCهای هوش مصنوعی	امتیاز آدامیک آدار
E21B	B25J-009	۱۲,۹۱۵۵۰۶۲۱۸۶	G09B-009/00	G06T-001/20	۷,۳۵۶۳۲۰۹۸۰۴
E21B	G06T-007/00	۱۲,۶۱۶۴۷۷۹۰۷۲	G09B-009/00	G10L-015/00	۷,۳۳۵۷۱۴۵۸۳۳
E21B	G06N-003/08	۱۰,۶۲۴۸۴۶۶۵۶۱	G01V-001/28	G06F-040	۷,۱۴۸۳۸۷۵۰۶۱
E21B	B25J-005	۱۰,۴۳۱۱۵۴۹۵۸	G01V-001/28	G06N-007/00	۷,۱۴۳۶۵۴۲۵۲۷
G09B-009/00	B25J-009	۹,۱۷۴۲۷۸۲۸۹۲	G01V-001/28	G06N-099/00	۷,۱۴۱۱۱۴۹۱۲
E21B	G06F-040	۸,۸۵۲۸۱۲۴۵۹۸	G01V-001/28	G06N-005/02	۷,۱۴۱۱۱۴۹۱۲
G01V-001/00	G06T-007/00	۸,۸۱۱۵۰۱۳۶۶۷	G01V-001/00	G06N-099/00	۷,۱۱۹۵۳۱۵۳۱۶
G09B-009/00	G06T-007/00	۸,۷۶۶۹۵۹۶۱۵۵	G01V-001/00	G06N-007/00	۷,۱۰۳۸۲۱۴۵۰۸
G09B-009/00	G06N-003/08	۸,۷۶۰۳۷۴۴۱۸۴	E21B	G06T-001/20	۷,۰۹۱۴۷۳۵۵۴۷
E21B	G06N-003/02	۸,۵۶۸۵۶۰۴۸۸۱	G09B-009/00	G06T-009/00	۷,۰۵۵۴۲۷۷۶۳۳
G09B-009/00	G06F-040	۸,۴۰۸۷۶۷۲۴۰۶	G01V-001/00	G06T-001/20	۷,۰۲۹۱۴۷۳۵۸۱
G01V-001/00	G06N-003/08	۸,۲۳۵۶۹۹۵۹۷	G01V-001/00	G06N-007/02	۶,۸۷۲۱۴۰۹۹۱۶
E21B	G06N-007/00	۸,۱۲۹۵۳۲۷۵۲۸	G01V-001/00	G06T-007/246	۶,۸۱۶۹۰۳۳۸۷۱
G09B-009/00	G06T-019/20	۸,۰۶۴۷۸۶۴۶۱۳	E21B	G06T-007/10	۶,۸۰۱۱۲۶۶۶۴۸
G09B-009/00	G06N-099/00	۸,۰۴۰۸۲۰۸۸۶۲	G01V-001/28	G06T-003/40	۶,۷۹۲۴۷۰۹۸۷۷
G09B-009/00	G06N-003/02	۸,۰۲۹۸۴۴۰۵۸۹	G01V-001/00	G06T-019/20	۶,۷۶۸۰۸۰۱۷۹۷
G09B-009/00	G06N-007/00	۸,۰۲۵۱۱۰۸۰۵۴	E21B	G06T-009/00	۶,۷۵۹۲۶۲۰۶۱۸
G09B-009/00	G06T-003/40	۸,۰۱۹۹۰۳۷۹۶۷	G01V-001/00	G06T-003/40	۶,۷۵۲۶۳۸۱۸۵۸
G01V-001/28	G06T-007/00	۷,۹۹۱۵۱۲۶۳۹۹	G01V-001/00	G06N-005/02	۶,۷۴۰۶۰۸۳۴۹۹
G01V-001/28	G06N-003/08	۷,۸۹۶۶۰۹۲۱۷۲	G09B-009/00	G06T-007/10	۶,۷۲۸۰۲۲۹۹۳۲
G09B-009/00	B25J-005	۷,۸۷۲۴۱۴۰۶۵۳	G01V-001/00	B25J-005	۶,۵۵۶۵۵۹۸۶۰۵
G01V-001/28	B25J-009	۷,۸۵۱۷۸۰۳۴۶۵	G01V-001/28	G06N-007/02	۶,۵۳۳۰۵۰۶۱۱۸
E21B	G06T-007/246	۷,۸۴۲۶۱۴۶۸۹	G01V-001/28	G06T-007/246	۶,۴۷۷۸۱۳۰۰۷۲
G09B-009/00	G06N-007/02	۷,۷۹۳۴۳۰۳۴۶۲	G01V-001/28	G10L-015/00	۶,۴۶۸۹۵۵۵۳۴۵
E21B	G06T-019/20	۷,۷۸۷۷۷۰۹۸	G01V-001/28	G06T-019/20	۶,۴۴۳۶۸۷۳۰۳۹
E21B	G06T-003/40	۷,۷۷۸۳۴۹۴۸۷۸	G09B-009/00	G10L-025/00	۶,۴۳۱۶۸۵۹۶۷۵
E21B	G06N-099/00	۷,۷۷۵۹۷۳۴۶۰۵	G01V-001/00	G10L-015/00	۶,۳۹۱۹۶۴۴۲۵۶
E21B	G06N-005/02	۷,۷۶۶۳۱۹۶۵۱۹	E21B	G06T-007/215	۶,۱۶۹۸۷۷۴۳۷۳
G09B-009/00	G06T-007/246	۷,۷۶۰۶۵۳۵۴۴۸	G01V-001/28	G06T-001/20	۶,۱۶۶۰۴۶۴۷۸۵
G09B-009/00	G06N-005/02	۷,۶۶۱۸۹۷۷۰۴۵	G01V-001/28	G06T-009/00	۶,۱۵۷۳۵۰۴۳۸۷
G01V-001/00	B25J-009	۷,۶۲۹۵۷۹۸۴۱۳	E21B	G10L-025/00	۶,۱۴۴۳۷۷۷۳۸۷
G01V-001/28	G06N-003/02	۷,۵۸۲۶۸۱۹۸۸	G09B-009/00	G10L-017/00	۶,۱۳۵۶۸۸۳۵۶۵
G01V-001/00	G06N-003/02	۷,۵۴۲۸۴۹۱۸۶۲	G09B-009/00	G06F-018/00	۶,۱۲۵۰۳۷۱۲۰۶
E21B	G06N-007/02	۷,۵۲۸۵۸۲۹۲۰۵	G01V-001/28	G10L-013/00	۶,۱۲۴۷۷۵۷۹۵۶
G01V-001/00	G06F-040	۷,۴۸۷۴۷۷۸۸۶	E21B	G10L-017/00	۶,۱۰۰۷۱۱۹۱۱۵
E21B	G10L-015/00	۷,۳۸۸۰۲۹۶۲۶۴	G09B-009/00	G10L-013/00	۶,۰۶۶۱۰۷۷۶۸۱

با توجه به ضرایب محاسبه شده و مقایسه آنها می‌توان پیش‌بینی کرد که زیرفناوری‌هایی از هوش مصنوعی با زیرفناوری‌هایی از حفاری همگرا خواهند شد. از آنجایی که دو زوج IPC آخر (G06T-007/10 ‒ G09B-009/00 و G01V-001/28 ‒ G10L-013/00) با ضریب ژاکارد بالای ۰.۶۵ مقدار آدامیک آدار پایینی داشته‌اند (کمتر از ۷)، به عنوان زوج‌هایی که پیش‌بینی همگرایی برای آنها صورت می‌گیرد، درنظر گرفته نمی‌شوند و در تحلیل نتایج پیش‌بینی حذف می‌گردند.

در نهایت، در شکل ۳ نیز گراف تشکیل شده با استفاده از پتنت‌های جمع‌آوری شده به تصویر کشیده شده است.



شکل ۳: گراف تشکیل شده با استفاده از داده‌های پتنت (منبع: نتایج پژوهش)

با توجه به نتایج بدست آمده و بررسی زیرفناوری‌ها، می‌توان تحلیلی از نتایج ارائه داد. بیشترین تعداد همگرایی میان زوج IPCهای حفاری-هوش مصنوعی با ضریب ژاکارد بالا مربوط به ICT حفاری و یادگیری ماشین می‌باشد که در جدول ۶ نشان داده شده است. با مراجعه به طبقه‌بندی IPCها و تعاریف هر کلاس، زیرکلاس و دسته اصلی که در راهنمای IPC[1] در وبگاه سازمان جهانی مالکیت معنوی (WIPO[2]) قابل دسترسی است، می‌توان چنین پیش‌بینی کرد که برای شبیه‌سازهای آموزشی، محاسبات جاذبه‌ای، تشخیص توده و پردازش داده‌های لرزه‌نگاری در حفاری از روش‌های مختلف یادگیری ماشین بیشتر استفاده خواهد شد و این دو حوزه از همگرایی بالایی برخوردار خواهند بود. در حالی که برخی از مقالات به محدودیت‌ها و چالش‌های به‌کارگیری یادگیری ماشین اشاره کرده‌اند (مسعود[3] و هو[4]، ۲۰۲۱؛ جیا[5] و ما[6]، ۲۰۱۷)، مقالات متنوعی نیز نتایج بدست آمده در این پژوهش را تایید می‌کنند. به عنوان نمونه، در یافته‌های این مقالات کاربرد فزاینده روش‌های یادگیری ماشین از جمله شبکه‌های عصبی و یادگیری عمیق برای بهینه‌سازی حفاری، بهبود تفسیر داده‌های لرزه‌نگاری و شبیه‌سازهای حفاری پیش‌بینی شده است (اولانتونجی[7] و همکاران، ۲۰۲۰؛ ناتیال[8] و میشرا[9]، ۲۰۲۰؛ لی[10] و همکاران، ۲۰۱۹). درنتیجه می‌توان چنین استنتاج کرد که یادگیری ماشین به عنوان یکی از زیرفناوری‌های هوش مصنوعی با زیرفناوری حفاری نفت همگرایی دارد که مطالعات مشابه انجام شده نیز این موضوع را تایید می‌کند.

جدول ۶: نتایج زوج IPCهای ICT و یادگیری ماشین (منبع: نتایج پژوهش)

IPCهای حفاری	زیرفناوری‌های حفاری	IPCهای هوش مصنوعی	زیرفناوری‌های هوش مصنوعی	ضریب ژاکارد	امتیاز آدامیک آدار
G09B-009/00	ICT	G06N-099/00	یادگیری ماشین	۰,۷۲۹۷۲۹۷۲۹۷	۸,۰٤۰۸۲۰۸۸٦۲
G09B-009/00	ICT	G06N-007/00	یادگیری ماشین	۰,۷۱۰۵۲٦۳۱۵۸	۸,۰۲۵۱۱۰۸۰۵٤
G09B-009/00	ICT	G06N-005/02	یادگیری ماشین	۰,٦۸٤۲۱۰۵۲٦۳	۷,٦٦۱۸۹۷۷۰٤۵
G09B-009/00	ICT	G06N-003/02	یادگیری ماشین	۰,٦۷۵	۸,۰۲۹۸٤٤۰۵۸۹

1. https://ipcpub.wipo.int/
2. World Intellectual Property Organization (WIPO)
3. Messud
4. Hou
5. Jia
6. Ma
7. Olantunji
8. Nautiyal
9. Mishra
10. Li

G01V-001/28	ICT	G06N-099/00	یادگیری ماشین	۰,٦٦٦٦٦٦٦٦٦٧	۷,١٤١١١٤٩١٢
G01V-001/28	ICT	G06N-005/02	یادگیری ماشین	۰,٦٦٦٦٦٦٦٦٦٧	۷,١٤١١١٤٩١٢
G09B-009/00	ICT	G06N-003/08	یادگیری ماشین	۰,٦٥٩٠٩٠٩٠٩١	٨,٧٦٠٣٧٤٤١٨٤
G01V-001/28	ICT	G06N-003/02	یادگیری ماشین	۰,٦٥٧٨٩٤٧٣٦٨	۷,٥٨٢٦٨١٩٨٨

پس از زوج IPCهای قبلی، بیشترین تعداد همگرایی مربوط به ICT و مهندسی حفاری و بینایی ماشین می‌باشد که در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. با مراجعه به تعاریف طبقه‌بندی IPCها، می‌توان چنین دریافت که برای حفاری زمین و سنگ، شبیه‌سازهای آموزشی، محاسبات جاذبه‌ای، تشخیص توده و لرزه‌نگاری برای حفاری از فناوری بینایی ماشین بیشتر استفاده خواهد شد که به طور خاص روش‌های متنوع تحلیل و کدگذاری تصویر و همینطور تحلیل حرکت را شامل می‌شود و نشان از همگرایی بالای این دو نوع فناوری در آینده دارد. با بررسی پژوهش‌های پیشین و مقایسه آنها با نتایج این بخش از مقاله حاضر، مشخص شد که محدودیت‌های فنی مختلفی در به‌کارگیری روش‌های بینایی ماشین و پردازش تصویر وجود دارد که به طور کلی در حال پیشرفت می‌باشد (نگلجاراتان[1] و همکاران، ۲۰۲۴؛ هو[2] و هوبر[3]، ۲۰۲۰). در عین حال، مقالات زیادی نیز بر بهبود معنادار کیفیت داده‌های لرزه‌نگاری با استفاده از روش‌های پردازش تصویر پیشرفته و بهینه‌سازی عملیات حفاری از طریق فناوری بینایی ماشین تاکید کرده‌اند (لی[4] و همکاران، ۲۰۲۱؛ تانگ[5] و همکاران، ۲۰۲۳؛ فو[6] و الدریچ[7]، ۲۰۲۰). بنابراین، با مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین می‌توان دریافت که کاربرد بینایی ماشین در مهندسی حفاری و ICT حفاری رو به افزایش است.

جدول ۷: نتایج زوج IPCهای حفاری و بینایی ماشین (منبع: نتایج پژوهش)

IPCهای حفاری	زیرفناوری‌های حفاری	IPCهای هوش مصنوعی	زیرفناوری‌های هوش مصنوعی	ضریب ژاکارد	امتیاز آدامیک آدار
G09B-009/00	ICT	G06T-019/20	بینایی ماشین	۰,٧٧١٤٢٨٥٧١٤	٨,٠٦٤٧٨٦٤٦١٣
G09B-009/00	ICT	G06T-003/40	بینایی ماشین	۰,٧٥	٨,٠١٩٩٠٣٧٩٦٧
E21B	مهندسی حفاری	G06T-007/00	بینایی ماشین	۰,٧١٦٩٨١١٣٢١	١٢,٦١٦٤٧٧٩٠٧٢
G09B-009/00	ICT	G06T-001/20	بینایی ماشین	۰,٧١٤٢٨٥٧١٤٣	۷,٣٥٦٣٢٠٩٨٠٤
G01V-001/00	ICT	G06T-001/20	بینایی ماشین	۰,٧٠٥٨٨٢٣٥٢٩	۷,٠٢٩١٤٧٣٥٨١

1. Ngeljaratan
2. Hou
3. Hoeber
4. Li
5. Tang
6. Fu
7. Aldrich

G09B-009/00	ICT	G06T-007/246	بینایی ماشین	۰,۷۰۲۷۰۲۷۰۲۷	۷,۷٦۰٦٥۳٥٤٤۸
G09B-009/00	ICT	G06T-009/00	بینایی ماشین	۰,٦۸٥۷۱٤۲۸٥۷	۷,۰٥٥٤۲۷۷٦۳۳

زیرفناوری رباتیک نیز با مهندسی حفاری در دو زوج IPC ضریب ژاکارد بالایی دریافت کرده‌اند که درجدول ۸ مشخص شده است. با بررسی تعاریف این دو زوج IPC چنین استنباط می‌شود که کاربرد رباتیک و به طور ویژه استفاده از بازوهای مکانیکی نصب شونده بر روی چرخ و بازوهای مکانیکی قابل کنترل از طریق برنامه در مهندسی حفاری مربوط به حفاری زمین یا سنگ، تهیه نفت، گاز، آب، محلول مواد ذوب شونده یا دوغاب مواد معدنی از چاه در آینده بیشتر خواهد شد و می‌توان کاربرد رباتیک در مهندسی حفاری را با همگرایی بالایی در آینده درنظر گرفت. مطالعات پیشین به طور فزاینده‌ای رشد استفاده از فناوری رباتیک و هوش مصنوعی را در بخش‌های مختلف حفاری از جمله خودکارسازی حفاری در دریا و در زمین، مدلسازی خودکار و در لحظه حفاری، تصمیم‌گیری در لحظه حفاری و افزایش دقت، ایمنی و کارآیی فرآیند حفاری نشان داده‌اند (آیسنستاین[1]، ۲۰۲۲). درنتیجه با توجه به نتایج تحقیق و همینطور بررسی مطالعات پیشین می‌توان دریافت که همگرایی رباتیک در مهندسی حفاری به صورت قوی و فزاینده‌ای در حال شکل‌گیری است.

جدول ۸: نتایج زوج IPCهای مهندسی حفاری و رباتیک (منبع: نتایج پژوهش)

IPCهای حفاری	زیرفناوری‌های حفاری	IPCهای هوش مصنوعی	زیرفناوری‌های هوش مصنوعی	ضریب ژاکارد	امتیاز آدامیک آدار
E21B	مهندسی حفاری	B25J-009	رباتیک	۰,۷٦۹۲۳۰۷٦۹۲	۱۲,۹۱٥٥۰٦۲۱۸٦
E21B	مهندسی حفاری	B25J-005	رباتیک	۰,٦٦	۱۰,٤۳۱۱٥٤۹٥۸

در نهایت نیز می‌توان به زوج IPCهای ICT در حفاری و پردازش زبان طبیعی، منطق فازی و پردازش گفتار در هوش مصنوعی اشاره کرد که در جدول ۹ خلاصه شده است. با بررسی این زوج IPCها می‌توان دریافت که برای شبیه‌سازهای آموزشی در حفاری از مدیریت داده‌های زبان طبیعی، محاسبات مبتنی بر منطق فازی و همینطور پردازش گفتار استفاده بیشتری خواهد شد. با بررسی نتایج تحقیقات قبلی، مشخص شد که پردازش زبان طبیعی و پردازش گفتار همسو با نتایج این تحقیق به خوبی در شبیه‌سازهای حفاری با اهداف آموزشی و همینطور در بهبود اثربخشی کاربرد فراوان یافته‌اند (ژانگ[2] و همکاران، ۲۰۲۲؛ هوفیمان[3] و همکاران، ۲۰۱۸).

1. Eisenstein
2. Zhang
3. Hoffimann

منطق فازی نیز با هدف بهبود قابلیت‌های تصمیم‌گیری برای کارآموزان حفاری به خوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (تالبی[1] و همکاران، ۲۰۲۲). بر این اساس، نتیجه بدست آمده از تحقیق همسو با تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که هوش مصنوعی از طریق ارتباط زیرفناوری‌های پردازش زبان طبیعی، منطق فازی و پردازش گفتار با زیرفناوری ICT در حفاری در حال همگرا شدن با حفاری صنعت نفت می‌باشد.

جدول ۹: نتایج زوج IPCهای ICT و پردازش زبان طبیعی، منطق فازی و پردازش گفتار (منبع: نتایج پژوهش)

IPCهای حفاری	زیرفناوری‌های حفاری	IPCهای هوش مصنوعی	زیرفناوری‌های هوش مصنوعی	ضریب ژاکارد	امتیاز آدامیک آدار
G09B-009/00	ICT	G06F-040	پردازش زبان طبیعی	۰,۷۱۷۹۴۸۷۱۷۹	۸,٤۰۸۷٦۷۲٤۰٦
G09B-009/00	ICT	G06N-007/02	منطق فازی	۰,۷۰۲۷۰۲۷۰۲۷	۷,۷۹۳٤۳۰۳٤٦۲
G09B-009/00	ICT	G10L-015/00	پردازش گفتار	۰,٦٥۷۸۹٤۷۳٦۸	۷,۳۳٥۷۱٤٥۸۳۳

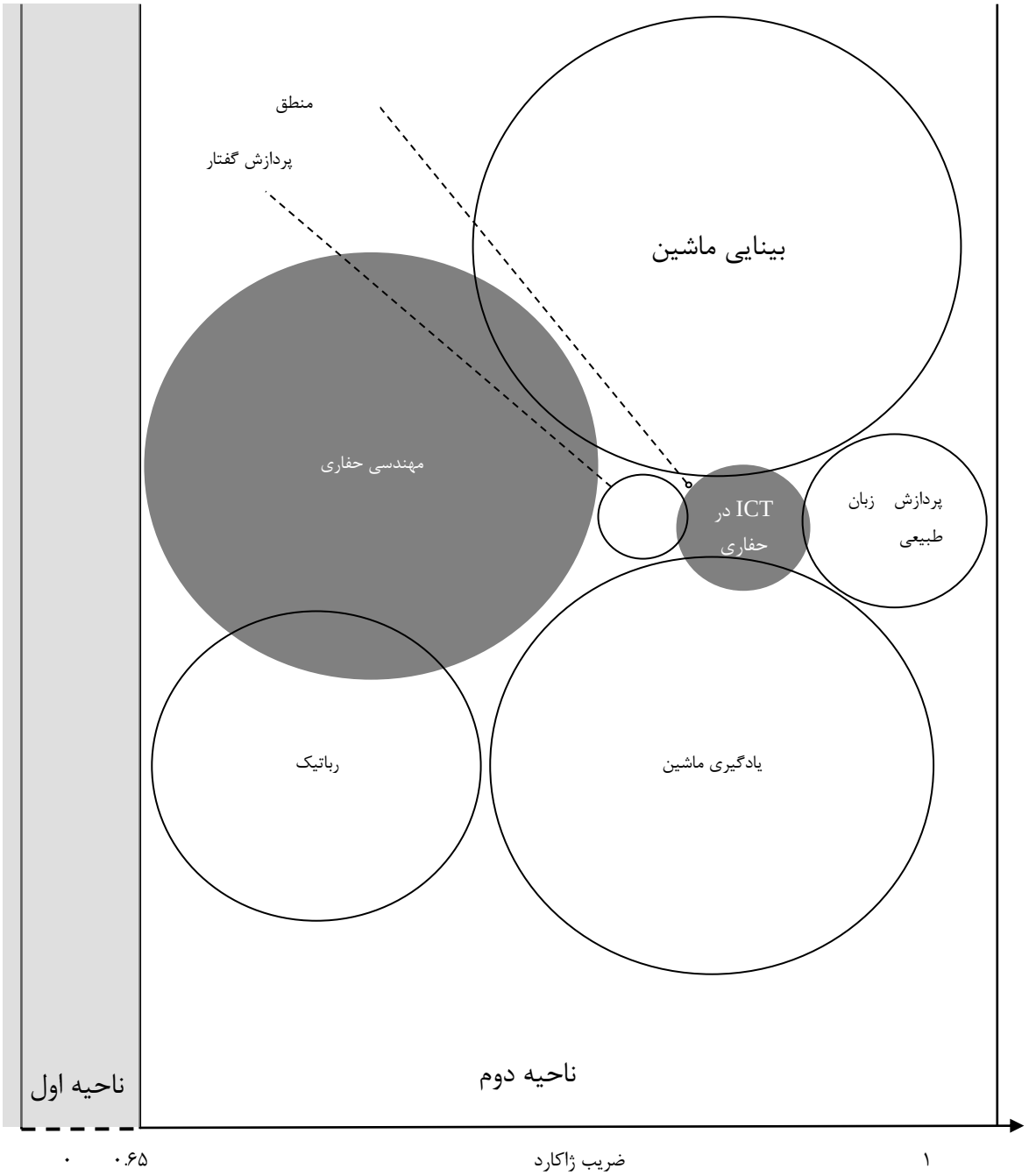
بحث و نتیجه‌گیری

به طور کلی، با مرور و بررسی نتایج و یافته‌های پژوهش‌های معتبر در زمینه همگرایی هوش مصنوعی و حفاری می‌توان نتیجه گرفت که علی‌رغم وجود محدودیت‌ها و چالش‌هایی در به‌کارگیری فناوری‌های زیرمجموعه هوش مصنوعی در حفاری، نتایج بدست آمده در این مطالعه با یافته‌های پیشین همسویی بالایی دارد. چالش‌های موجود در استفاده از این فناوری‌ها نیز عمدتا به دلیل جدید بودن روش‌ها و تکنیک‌های هوش مصنوعی است که با گذشت زمان و پیشرفت در این زمینه‌ها مرتفع خواهد شد. با بررسی نتایج مقاله حاضر و مقایسه آن با تحقیقات گذشته، مشخص شد که به طور خاص یادگیری ماشین، بینایی ماشین و رباتیک کاربرد گسترده‌تری در بخش‌های مختلف عملیات حفاری داشته و پیش‌بینی می‌شود در این حوزه‌ها شاهد رشد و همگرایی بیشتری باشیم (اوربیناتی[2] و همکاران، ۲۰۱۸؛ سیارلی[3] و همکاران، ۲۰۲۱).

در شکل شماره ۴ به صورت شماتیک، همگرایی زیرفناوری‌های هوش مصنوعی و حفاری را بر روی محوری افقی نشان داده شده است. درواقع با توجه به اینکه ضریب ژاکارد همیشه عددی بین صفر و یک قرار می‌گیرد،

1. Talbi
2. Urbinati
3. Ciarli

محور ترسیم شده نیز از صفر تا یک را شامل می‌شود. از آنجایی که زیرفناوری‌ها با ضرایب ژاکارد بالای ۰.۶۵ به عنوان حدی بیانگر همگرایی قوی‌تر درنظر گرفته شده است، زوج زیرفناوری‌ها با ضریب بالای ۰.۶۵ در این شکل نمایش داده شده است که می‌توان در ناحیه دوم آنها را مشاهده نمود. ناحیه اول نیز مربوط به زیرفناوری‌های با ضریب کمتر از ۰.۶۵ می‌باشد که در این شکل نمایش داده نشده‌اند. لازم به توضیح است که قطر دایره‌های هر زیرفناوری نمایش داده شده متناسب با تعداد پتنت‌ها در آن حوزه می‌باشد. همچنین دایره‌های سفیدرنگ و خاکستری به ترتیب مربوط به زیرفناوری‌های هوش مصنوعی و حفاری هستند.



شکل ۴: حوزه‌های همگرای هوش مصنوعی و حفاری (منبع: نتایج پژوهش)

پس از بررسی نتایج بدست آمده و مقایسه نظری انجام شده با ادبیات موضوع اکنون می‌توان با نظر به اهمیت کاربردی این مطالعه در سطح کلان، به ارائه چند پیشنهاد سیاستی متناسب با نتایج نیز پرداخت. با توجه به اینکه سه زیرفناوری یادگیری ماشین، بینایی ماشین و رباتیک بیشترین تاثیر را در همگرایی با فناوری‌های مربوط به

حفاری دارند، پیشنهادات سیاستی زیر حول محور کاربرد این سه زیرفناوری در حفاری در دو سطح کلان و شرکتی به شرح زیر ارائه می‌گردد.

پیشنهادهای سیاستی در سطح کلان (دولتی و صنعت):

- **تشویق به سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه:** ارائه مشوق‌های مالی مانند اعتبار مالیاتی، کمک‌های مالی یا یارانه‌ها به شرکت‌های نفتی که در فناوری‌های حفاری مبتنی بر هوش مصنوعی سرمایه‌گذاری می‌کنند.
  - ✓ این نوع حمایت‌های عمومی از تحقیق و توسعه، باعث تشویق نوآوری در کاربردهای یادگیری ماشین، بینایی ماشین و رباتیک برای حفاری می‌شود که می‌تواند منجر به پیشرفت‌هایی در بهبود کاوش، استخراج و نظارت در فرایند حفاری نفت و همچنین کاهش ریسک سرمایه‌گذاری‌ها در این حوزه گردد.
- **توسعه چارچوب‌های نظارتی یکپارچه با هوش مصنوعی:** به‌روزرسانی مقررات برای پرداختن به چالش‌ها و ریسک‌های منحصر به فرد مرتبط با فناوری‌های حفاری مبتنی بر هوش مصنوعی و اطمینان از حفظ استانداردهای ایمنی و محیط زیست.
  - ✓ سیاست‌گذاران باید مقررات خاص هوش مصنوعی برای عملیات حفاری طراحی کنند که مسائل پیش‌بینی‌ناپذیری و شفافیت سیستم‌های خودکار را درنظر بگیرند.
- **ترویج توسعه مهارت‌های هوش مصنوعی و تحلیل داده در نیروی کار:** همکاری با موسسات آموزشی برای ارائه برنامه‌های هوش مصنوعی، علوم داده ویژه نفت و گاز، از جمله برنامه‌های آموزشی متمرکز بر یادگیری ماشین، بینایی ماشین و رباتیک.
  - ✓ با تغییر شکل فناوری‌های هوش مصنوعی در حفاری، مجموعه مهارت‌های جدیدی برای مدیریت و بهینه‌سازی سیستم‌های هوش مصنوعی لازم است. حمایت از ابتکارات آموزش مجدد و ارتقا مهارت‌های نیروی کار، این اطمینان را ایجاد می‌کند که کارکنان می‌توانند با این نوآوری‌ها سازگار شوند و ترس جابجایی شغلی کاهش می‌یابد.

پیشنهادهای سیاستی در سطح شرکتی:

- **سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه در زمینه هوش مصنوعی:** شرکت‌ها باید بخش قابل توجهی از بودجه نوآوری خود را به تحقیقات هوش مصنوعی با تمرکز ویژه بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای نگهداری پیش‌بینانه، تجهیزات حفاری رباتیک و بینایی ماشین برای نظارت در لحظه اختصاص دهند.

- ✓ سرمایه‌گذاری در هوش مصنوعی در سطح شرکتی باعث ایجاد مزیت رقابتی و بهبود کارایی عملیاتی می‌شود.

- **همکاری با استارتاپ‌های هوش مصنوعی و شرکت‌های فناور:** شرکت‌های نفتی بزرگ باید با استارتاپ‌های هوش مصنوعی و شرکت‌های فناور همکاری کنند تا از تحصص‌های خاص در حوزه‌های نظیر یادگیری ماشین، بینایی ماشین و رباتیک بهره‌مند شوند.
  - ✓ با همکاری با متخصصان فناوری، شرکت‌های نفت و گاز می‌توانند پذیرش هوش مصنوعی خود را تسریع کرده و از آخرین نوآوری‌ها بهره‌مند شوند و در عین حال بر عملیات حفاری اصلی خود متمرکز بمانند. این همکاری همچنین می‌تواند هزینه‌ها و ریسک‌های مرتبط با توسعه قابلیت‌های داخلی هوش مصنوعی را کاهش دهد.
- **ترویج فرهنگ نوآوری و ارتقا مهارت‌ها:** شرکت‌ها باید فرهنگی سازمانی ایجاد کنند که پذیرش هوش مصنوعی را تشویق کند و فرصت‌های آموزشی و توسعه حرفه‌ای مستمر در زمینه هوش مصنوعی، علوم داده و رباتیک را فراهم کنند.
  - ✓ پذیرش موفقیت‌آمیز هوش مصنوعی به تمایل و توانایی کارکنان برای کار با فناوری‌های جدید بستگی دارد. پرورش یک فرهنگ یادگیری‌محور تضمین می‌کند که کارکنان با تغییرات فناوری سازگار بوده و به عنوان نیروی محرکه این تحولات عمل می‌کنند.

در پایان به بیان نوآوری پژوهش و محدودیت‌های انجام آن پرداخته می‌شود. در این مقاله تلاش شد خلأ پژوهشی معطوف به پیش‌بینی همگرایی دو فناوری و صنعت متفاوت پاسخ داده شود و نحوه همگرایی دو فناوری حفاری و هوش مصنوعی با درنظر گرفتن زیرفناوری‌های آنها و با استفاده از داده‌های معتبر پتنت پیش‌بینی شود. بنابراین، این نوآوری مفهومی می‌تواند از سوگیری نتایجی که اغلب در روش‌های کیفی پیش‌بینی فناوری رخ می‌دهد بکاهد. همچنین می‌توان استفاده از روش پیش‌بینی پیوند در شبکه به عنوان یک روش نسبتا جدید را به عنوان نوآوری فنی این پژوهش درنظر گرفت.

همانند دیگر پژوهش‌های علمی، مطالعه حاضر نیز با محدودیت‌هایی همراه بوده است که می‌تواند در انجام تحقیقات بعدی مورد توجه قرار گیرد. اولین و مهم‌ترین محدودیت این پژوهش تعیین دو حوزه خاص هوش مصنوعی و حفاری از میان کل فناوری‌های دیجیتال و فناوری‌های صنعت نفت می‌باشد. بدیهی است حجم داده‌های پتنت مورد بررسی در این پژوهش بسیار بالا بوده و در صورت دخیل کردن دیگر فناوری‌های متنوع این دو حوزه،

مشکلات جدی در روند پردازش داده در این پژوهش ایجاد می‌شد. اما پیشنهاد می‌گردد پژوهشگران به مطالعه بخش‌های دیگر همچون بررسی فناوری‌هایی نظیر زنجیره بلوکی و اینترنت اشیا در عملیات‌های مختلف صنعت نفت بپردازند. محدودیت دیگر مربوط به نوع روش مورد استفاده است. به دلیل پردازش حجم بالای داده، شبکه هم‌رخدادی تشکیل شده در طول زمان بررسی نشد. اما پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با درنظر گرفتن قید زمان پیش‌بینی همگرایی دقیق‌تری از حیث زمان در آینده ارائه گردد. در این حالت می‌توان به پیش‌بینی همگرایی در افق‌های زمانی مشخص رسید.

منابع

Abbas, A., Zhang, L., & Khan, S. (2014). A literature review on the state-of-the-art in patent analysis. World Patent Information, 37. https://doi.org/10.1016/j.wpi.2013.12.006

Bote-Lorenzo, M., Gómez-Sánchez, E., Mediavilla-Pastor, C., & Asensio-Pérez, J. (2018). Online machine learning algorithms to predict link quality in community wireless mesh networks. Computer Networks, 132. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.01.005

Caferoglu, H., Elsner, D., & Moehrle, M. G. (2023). The Interplay Between Technology and Pre-Industry Convergence: An Analysis in the Technology Field of Smart Mobility. IEEE Transactions on Engineering Management, 70(4), 1504–1517. https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3092211

Cho, Y., & Daim, T. (2013). “Technology Forecasting Methods”, in Research and Technology Management in the Electricity Industry: Methods, Tools and Case Studies (pp. 67–112).

Choi, J. Y., Jeong, S., & Kim, K. (2015). A Study on Diffusion Pattern of Technology Convergence: Patent Analysis for Korea. Sustainability, 7, 11546–11569. https://doi.org/10.3390/su70911546

Choi, S., Afifuddin, M., & Seo, W. (2022). A Supervised Learning-Based Approach to Anticipating Potential Technology Convergence. IEEE Access, 10, 19284–19300. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151870

Ciarli, T., Kenney, M., Massini, S., & Piscitello, L. (2021). Digital technologies, innovation, and skills: Emerging trajectories and challenges. Research Policy, 50(7), 104289. https://doi.org/10.1016/j.respol.2021.104289

de Mello Vianna, C. M., Fermam, M. K. S., da Silva Rodrigues, M. P., & Mosegui, G. B. G. (2016). The Link Between Industry and Social Interests in Health in Brazil’s National Health Innovation System: The Experience of the Brazilian National Institute of Traumatology and Orthopedics (INTO). Cadernos De Saúde Pública. https://doi.org/10.1590/0102-311x00189414

Digital Economy Compass (Digital Economy Compass). (2019). Statistica. www.statista.com/outlook/digital-markets

Drew, S. A. W. (2006). Building technology foresight: Using scenarios to embrace innovation. European Journal of Innovation Management, 9(3), 241–257. https://doi.org/10.1108/14601060610678121

Eisenstein, M. (2022). Four ways that AI and robotics are helping to transform other research fields. Nature, 610, S6–S8. https://doi.org/10.1038/d41586-022-03209-2

Fu, Y., & Aldrich, C. (2020). Deep Learning in Mining and Mineral Processing Operations: A Review. IFAC-PapersOnLine, 53(2), 11920–11925. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.712

Gruetzemacher, R., Dorner, F. E., Bernaola-Alvarez, N., Giattino, C., & Manheim, D. (2021). Forecasting AI progress: A research agenda. Technological Forecasting and Social Change, 170, 120909. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120909

Haleem, A., Mannan, B., Luthra, S., Kumar, S., & Khurana, S. (2019). Technology forecasting (TF) and technology assessment (TA) methodologies: A conceptual review. Benchmarking: An International Journal, 26(1), 48–72. https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2018-0090

Hassani, H., Silva, E., & Kaabi, A. (2017). The role of innovation and technology in sustaining the petroleum and petrochemical industry. Technological Forecasting and Social Change. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.03.003

Hoffimann, J., Mao, Y., Wesley, A., & Taylor, A. (2018). Sequence Mining and Pattern Analysis in Drilling Reports with Deep Natural Language Processing. https://doi.org/10.2118/191505-MS

Holland, C., McCarthy, A., Ferri, P., & Shapira, P. (2024). Innovation intermediaries at the convergence of digital technologies, sustainability, and governance: A case study of AI-enabled engineering biology. Technovation, 129, 102875. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102875

Hou, S., & Hoeber, H. (2020). Seismic Processing with Deep Convolutional Neural Networks: Opportunities and Challenges. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202010647

Hou, S., & Messud, J. (2021). Machine learning for seismic processing: The path to fulfilling promises. 3204–3208. https://doi.org/10.1190/segam2021-3590137.1

Huang, Y., Porter, A. L., Zhang, Y., Lian, X., & Guo, Y. (2019). An assessment of technology forecasting: Revisiting earlier analyses on dye-sensitized solar cells (DSSCs). Technological Forecasting and Social Change, 146, 831–843. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.10.031

Issa, H., Jabbouri, R., & Palmer, M. (2022). An artificial intelligence (AI)-readiness and adoption framework for AgriTech firms. Technological Forecasting and Social Change, 182, 121874. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121874

Jia, Y., & Ma, J. (2017). What can machine learning do for seismic data processing? An interpolation application. GEOPHYSICS, 82, V163–V177. https://doi.org/10.1190/geo2016-0300.1

Joelen Pastva, R. K., Bart Davis, Karen Gutzman, & Sorensen, A. (2020). Compelling Evidence: New Tools and Methods for Aligning Collections with the Research Mission. The Serials Librarian, 78(1–4), 219–227. https://doi.org/10.1080/0361526X.2020.1701393

Jung, S., Kim, K., & Lee, C. (2021). The nature of ICT in technology convergence: A knowledge-based network analysis. PLOS ONE, 16(7), 1–20. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254424

Kim, D., Lee, H., & Kwak, J. (2017). Standards as a driving force that influences emerging technological trajectories in the converging world of the Internet and things: An investigation of the M2M/IoT patent network. Research Policy, 46(7), 1234–1254. https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.05.008

Lee, C., Hong, S., & Kim, J. (2021). Anticipating multi-technology convergence: A machine learning approach using patent information. Scientometrics, 126(3), 1867–1896. https://doi.org/10.1007/s11192-020-03842-6

Lee, C., Park, G., & Kang, J. (2018). The impact of convergence between science and technology on innovation. The Journal of Technology Transfer, 43(2), 522–544. https://doi.org/10.1007/s10961-016-9480-9

Li, D., Peng, S., Lu, Y., Guo, Y., & Cui, X. (2019). Seismic structure interpretation based on machine learning: A case study in coal mining. Interpretation, 7, 1–44. https://doi.org/10.1190/int-2018-0208.1

Maleki, A., & Rosiello, A. (2019). Does knowledge base complexity affect spatial patterns of innovation? An empirical analysis in the upstream petroleum industry. Technological Forecasting and Social Change, 143, 273–288. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.020

Naghizadeh, M., Manteghi, M., & Naghizadeh, R. (2015). CONVERGENCE AMONG SCIENCE AND TECHNOLOGY CAPABILITIES OF DIFFERENT PLAYERS IN AVIATION COMPLEX PRODUCT SYSTEMS. Journal of Technology Development Management, 3(3), 27–54. https://doi.org/10.22104/jtdm.2016.367 [in Persian]

Ngeljaratan, L., Bas, E. E., & Moustafa, M. A. (2024). Unmanned Aerial Vehicle-Based Structural Health Monitoring and Computer Vision-Aided Procedure for Seismic Safety Measures of Linear Infrastructures. Sensors, 24(5). https://doi.org/10.3390/s24051450

Park, I., & Yoon, B. (2018). Technological opportunity discovery for technological convergence based on the prediction of technology knowledge flow in a citation network. Journal of Informetrics, 12(4), 1199–1222. https://doi.org/10.1016/j.joi.2018.09.007

Park, S., & Jun, S. (2022). Patent Analysis Using Bayesian Data Analysis and Network Modeling. Applied Sciences, 12, 1423. https://doi.org/10.3390/app12031423

Proskuryakova, L., & Filippov, S. (2015). Energy Technology Foresight 2030 in Russia: An Outlook for Safer and More Efficient Energy Future. Energy Procedia, 75, 2798–2806. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.550

Sick, N., Preschitschek, N., Leker, J., & Bröring, S. (2019). A new framework to assess industry convergence in high technology environments. Technovation, 84–85, 48–58. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2018.08.001

Talbi, B., Laib, A., & Gharib, M. (2023). Stick-slip stabilization in oil well drill-strings via optimal hybrid fractional order fuzzy logic control scheme. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 42(2), 911–926. https://doi.org/10.1177/14613484221135863

Tang, Z., Wu, B., Wu, W., & Ma, D. (2023). Fault Detection via 2.5D Transformer U-Net with Seismic Data Pre-Processing. Remote Sensing, 15(4). https://doi.org/10.3390/rs15041039

Urbinati, A., Chiaroni, D., Chiesa, V., & Frattini, F. (2018). The Role of Digital Technologies in Open Innovation Processes: An exploratory multiple case study analysis. R& D Management, 50, 136–160. https://doi.org/10.1111/radm.12313

Wacker, J. G. (1998). A definition of theory: Research guidelines for different theory-building research methods in operations management. Journal of Operations Management, 16(4), 361–385. https://doi.org/10.1016/S0272-6963(98)00019-9

Yang, Y., Lichtenwalter, R., & Chawla, N. (2015). Evaluating Link Prediction Methods. Knowledge and Information Systems, 45. https://doi.org/10.1007/s10115-014-0789-0

Yuskevich, I., Smirnova, K., Vingerhoeds, R., & Golkar, A. (2021). Model-based approaches for technology planning and roadmapping: Technology forecasting and game-theoretic modeling. Technological Forecasting and Social Change, 168, 120761. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120761

Zhang, L., Liu, L., Huang, G., Zhu, H., Zha, H., Qiu, Z., Zhang, X., & Lu, W. (2022). Improving the performance of Uyghur speech recognition based on Factorized Time-Delay Neural Network. Journal of Physics: Conference Series, 2400, 012059. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2400/1/012059

Zhong, R., Salehi, C., & Johnson Jr, R. (2022). Machine Learning for Drilling Applications: A Review. Journal of Natural Gas Science and Engineering. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104807