Sustainable Urban & Regional Development Studies Quarterly

Volume 5, Issue 4 - Serial Number 18, Winter 2025 **Online ISSN: 2783-0764**
Journal Hompage https://www.srds.ir/
https://www.srds.ir/article_211193.html?lang=en

The impact of key dimensions of the Fourth Industrial Revolution on urban environmental and social sustainability (Case study: Zanjan city's oil industry)

Mehdi Ajalli*
1.Assistant Professor, Department of Management, Faculty of Management and Accounting, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran; m.ajalli@basu.ac.ir

Received Date: 07 October 2024 **Accepted Date:** 10 December 2024

Abstract

Background and Aim: In recent years and after the fourth industrial revolution took place at the conference in Germany, researchers and industrialists have investigated the influencing factors of this revolution in various industries. On the other hand, they have realized the effect of these factors in improving the stability of production. This study aims to describe the key dimensions of the fourth industrial revolution, to investigate the impact of these dimensions on urban environmental and social sustainability, and to prioritize these dimensions in terms of importance in the zinc industry of Zanjan city. For this purpose, after presenting the conceptual model of the influencing dimensions of the fourth industrial revolution on environmental and social sustainability, six proposed hypotheses were tested. The statistical population consisted of industry experts and specialists with high knowledge and experience, and due to being unknown and unlimited, 384 samples were obtained by using Cochran's table, and finally 410 online questionnaires were collected and analyzed. The content validity of the designed questionnaire questions was confirmed by the opinions of industry and academic experts and the reliability of the questionnaires was 0.823 using SPSS software.

Methods and Material: The research method is applied-descriptive-survey in terms of goal and data collection. The output of the hypotheses test with the path analysis approach and SPLS software showed the confirmation of all the hypotheses and the positive impact of the dimensions on the sustainability of the industry, and the value of goodness of fit of the model was calculated as 0.302. In the following, with the weighted arithmetic mean method, the mentioned dimensions were re-evaluated by experts and the prioritization of the dimensions was determined.

Results and Discussion: The result indicates that "artificial intelligence" with the most weight was ranked first, and the dimensions of "blockchain technology" and "Internet of things" were ranked second and third. Also, the dimension "robotics" with the least weight was placed in the sixth priority. At the end, practical suggestions were presented to the industry.

Key words: The fourth industrial revolution, industry 0.4, environmental and social sustainability, path analysis, weighted average, Zanjan.

* **Correspong Author Email:** m.ajalli@basu.ac.ir
Cite this article: Ajalli, M. (2024). The impact of key dimensions of the Fourth Industrial Revolution on urban environmental and social sustainability (Case study: Zanjan city's oil industry). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, *5*(4), 115-129.

فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای

دوره ۵، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۸، زمستان ۱۴۰۳ شاپا:۰۷۶۴-۲۷۸۳

Journal Hompage https://www.srds.ir/
https://www.srds.ir/article_211193.html

تأثیر ابعاد کلیدی انقلاب صنعتی چهارم بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی شهری (مورد مطالعه: صنعت روی شهر زنجان)

دکتر مهدی اجلی*

۱. استادیار گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران؛

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

چکیده

زمینه و هدف: در سال‌های اخیر و پس از وقوع انقلاب صنعتی چهارم در کنفرانس آلمان، محققان و صنعتگران به بررسی عوامل تأثیرگذار این انقلاب در صنایع مختلف پرداخته‌اند. از طرفی، به تأثیر این عوامل در بهبود وضعیت‌های پایداری در تولید پی برده‌اند. هدف اصلی مطالعه حاضر، توصیف ابعاد کلیدی انقلاب صنعتی چهارم، بررسی تأثیر این ابعاد بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی شهری و اولویت‌بندی این ابعاد از لحاظ اهمیت در صنعت روی شهر زنجان است. بدین منظور پس از ارائه مدل مفهومی ابعاد تأثیرگذار انقلاب صنعتی چهارم بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی، شش فرضیه پیشنهادی مورد آزمون قرار گرفتند. جامعه آماری مشتمل بر خبرگان و متخصصان صنعت با دانش و تجربه بالا بود که به دلیل نامعلوم و نامحدودبودن، با استفاده از جدول کوکران، تعداد ۳۸۴ نمونه حاصل شد که در نهایت ۴۱۰ پرسشنامه آنلاین جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفت. روایی محتوای سوالات پرسشنامه طراحی‌شده با نظرات خبرگان صنعت و محیط دانشگاهی موردتأیید قرار گرفت و پایایی پرسشنامه‌ها با نرم‌افزار SPSS، مقدار ۰/۸۲۳ حاصل شد.

روش بررسی: روش پژوهش از لحاظ هدف و گردآوری اطلاعات از نوع کاربردی- توصیفی- پیمایشی است. خروجی آزمون فرضیه‌ها با رویکرد تحلیل مسیر و نرم‌افزار SPLS، نشان از تأیید تمامی فرضیات و تأثیرگذاری مثبت ابعاد در پایداری صنعت داشت و مقدار نیکویی برازش مدل، ۰/۳۰۲ محاسبه شد. در ادامه با روش میانگین حسابی موزون، ابعاد مذکور موردارزیابی مجدد خبرگان قرار گرفت و اولویت‌بندی ابعاد تعیین شد. نتیجه حاکی از آن است که "هوش مصنوعی" با بیشترین وزن در رتبه اول، و ابعاد "فناوری بلاکچین" و "اینترنت اشیا" در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. همچنین بعد "رباتیک" با کمترین وزن در اولویت ششم اهمیت جای گرفت. در پایان پیشنهادهای کاربردی به صنعت ارائه شد.

یافته ها و نتیجه گیری: نتیجه ارزیابی‌ها نشان داد که "هوش مصنوعی" با بیشترین وزن در رتبه اول، و ابعاد "فناوری بلاکچین" و "اینترنت اشیا" در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین بعد "رباتیک" با کمترین وزن در اولویت ششم اهمیت جای گرفت.

کلید واژه‌ها: انقلاب صنعتی چهارم، صنعت ۴/۰، پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی، تحلیل مسیر، میانگین موزون،زنجان

* **نویسنده مسئول:** m.ajalli@basu.ac.ir

ارجاع به این مقاله: اجلی, مهدی . (۱۴۰۳). ۹.تأثیر ابعاد کلیدی انقلاب صنعتی چهارم بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی شهری (مورد مطالعه: صنعت روی شهر زنجان). *فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای*, ۵(۴), ۱۱۵-۱۲۹.

۱.مقدمه و بیان مسأله

در عصر جهانی‌شدن، آگاهی در مورد مسائل پایداری در بین سازمان‌ها به سرعت در حال افزایش است که نیاز بیشتری را جهت اجرای اقدام‌های پایدار در زنجیره‌های تامین برای کاهش مشکلات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی ایجاد می‌کند. پایداری توسط کمیسیون جهانی محیط‌زیست به عنوان توسعه‌ای که نیازهای نسل حاضر را با آگاهی از کمبود منابع طبیعی برآورده سازد، تعریف می‌گردد. در طول زمان، میزان اهمیت‌نسبی ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای پایداری متفاوت بوده است. مدیریت همه جنبه‌های پایداری در یک سازمان بدلیل نیاز به تجدید ساختار کلی آن با تمرکز بر اتخاذ فن‌آوری‌های صنایع نسل چهارم و تولید پاک امری چالش برانگیز شده است (حسین‌پور و قربان‌پور، ۱۴۰۲).

با ورود و توسعه صنعت، پیامدهای زیست محیطی و اجتماعی نیز در گذر زمان پدیدار می شود. به محض اینکه کشورهای در حال توسعه، تکنولوژی کشورهای غربی را می پذیرند، ساخت های اجتماعی نیز تغییر می کند و محیط زیست منطقه نیز از این توسعه، تاثیر می پذیرد. توجّه به ارزیابی اثرات محیطی و اجتماعی به طور گسترده مورد نیاز کشورهای در حال توسعه است؛ زیرا به علّت توسعه نیافتگی اقتصادی و نبودِ زیرساخت‌های مناسب علمی و فنّی، طرح های توسعه در این کشورها تأثیر منفی فراوانی بر تنوّع زیستی و محیط زیست می گذارند (نوروززاده و همکاران، ۱۴۰۰).

تأثیر زیست‌محیطی و اجتماعی فعالیت‌های صنعتی در سرتاسر جهان تحت نظارت فزاینده‌ای قرار گرفته است. بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، انتشار دی‌اکسید کربن از احتراق جهانی ناشی از فرآیندهای صنعتی و سوخت‌های فسیلی حدود ۳۵ درصد (۳۴/۰۷ میلیارد تن) افزایش یافت که منجر به افزایش مصرف منابع، آلودگی و تخریب محیط زیست شد و به تغییرات آب و هوایی کمک کرد. سیستم‌های تولید سنتی همچنین باعث ایجاد مشکلات اجتماعی مانند درآمد پایین، فقر، اختلاف دستمزد، عدم اتحاد و ناهماهنگی اجتماعی می‌شوند. در این زمینه، شرکت‌های تولیدی با چالش‌هایی در برآوردن خواسته‌های مصرف‌کنندگان و ترجیحات رو به رشد مواجه شده‌اند که به‌طور فزاینده‌ای عادات خرید خود را به سمت محصولات پایدارتر تغییر داده‌اند. شرکت‌های تولیدی باید منابع طبیعی بیشتری را که برای تولید ضروری هستند حفظ کنند و این اعتقاد وجود دارد که توسعه فناوری‌ها و پیاده‌سازی آن‌ها، شرکت‌های تولیدی را قادر می‌سازد تا عملکرد خود را بهبود بخشند و به طور همزمان به پایداری زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی برای توسعه پایدار دست یابند. فناوری سهم اصلی در پیاده‌سازی صنعت ۴/۰ در شرکت‌های تولیدی است صنعت ۴/۰، همچنین به عنوان چهارمین انقلاب صنعتی توصیف می‌شود و نشان‌دهنده روند فعلی فناوری‌های اتوماسیون در صنعت تولید است و به ویژه فناوری‌های توانمند (مانند اینترنت اشیا، سیستم‌های فیزیکی سایبری و رایانش ابری) را پوشش می‌دهد. اولین انقلاب صنعتی، سیستم‌های تولید مکانیکی را با استفاده از بخار و نیروی آب معرفی کرد. تولید انبوه از طریق انرژی الکتریکی، انقلاب صنعتی دوم را توصیف می‌کند. در انقلاب صنعتی سوم، استفاده از فناوری میکروالکترونیک و اتوماسیون در تولید ظاهر شد. پیاده‌سازی فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات توسط شرکت‌های تولیدی کمک زیادی به این پیشرفت فناوری می‌کند (به عنوان مثال، تولید یکپارچه رایانه‌ای، برنامه‌ریزی پردازش به کمک رایانه، تولید به کمک رایانه، فناوری‌های طراحی به کمک رایانه، ربات‌های صنعتی ساخت انعطاف‌پذیر، سیستم ها، کنترل عددی کامپیوتری. اگرچه انقلاب صنعتی سوم بر اتوماسیون ماشین‌ها و فرآیندها تمرکز دارد، صنعت ۴/۰ بیشتر بر دیجیتالی‌سازی انتها به انتها و ادغام اکوسیستم‌های صنعتی دیجیتال تمرکز دارد و به دنبال راه‌حل‌های کاملاً یکپارچه است. صنعت ۴/۰ بر ۹ رکن تکنولوژیکی مبتنی است: کلان داده[1] ابر[2] اینترنت صنعتی[3] ادغام افقی و عمودی[4] شبیه سازی[5] واقعیت افزوده[6] ساخت افزودنی[7] امنیت سایبری و ساخت پیشرفته[8] بنابراین، صنعت ۴/۰، با اجرای متدولوژی های بهبود مستمر و فناوری‌های پیشرفته جدید، می‌تواند آینده ای پایدار و فزاینده را ارائه دهد در پیگیری پایداری و با اجرای صنعت ۴/۰ می توان به مزایای متعددی دست یافت؛ از جمله ۱) افزایش تولید محصولات دایره ای[9] ۲) بهبود کارایی و کیفیت، کاهش مصرف منابع و افزایش بهره‌وری و۳) تولید محصولات خاص با زمان کوتاه تر. با این حال، مشکلاتی در پیاده سازی صنعت ۴/۰ وجود دارد که ناشی از موارد زیر است: ۱) دشواری در آموزش و استخدام منابع انسانی در فناوری دیجیتال ۲) مهارت های مدیریتی جدید مورد نیاز است۳) پیچیدگی تغییر یک فرهنگ سازمانی (جوائو[1] و همکاران، ۲۰۲۳).

تولید روی در جهان همچنان در حال افزایش است. این اساساً به این معنی است که روی بیشتر از قبل به محیط زیست می‌رسد. آب به دلیل وجود مقادیر زیادی روی در فاضلاب کارخانه های صنعتی آلوده می شود. این فاضلاب به طور رضایت بخشی تصفیه نشده است و یکی از پیامدهای آن این است که رودخانه ها لجن آلوده به روی را در سواحل خود رسوب می کنند. روی همچنین ممکن است اسیدیته آب را افزایش دهد. برخی از ماهی ها زمانی که در آبراه های آلوده به روی زندگی می کنند، می توانند روی را در بدن خود جمع کنند. هنگامی که روی وارد بدن این ماهی ها می شود، می تواند زنجیره غذایی را به صورت زیستی بزرگ کند. مقادیر زیادی روی در خاک یافت می شود. هنگامی که خاک زمین های کشاورزی با روی آلوده می شود، حیوانات غلظت هایی را جذب می کنند که برای سلامتی آنها مضر است. روی محلول در آب که در خاک قرار دارد می تواند آب های زیرزمینی را آلوده کند. روی نه تنها برای گاو بلکه برای گونه های گیاهی نیز تهدیدی است. گیاهان اغلب دارای جذب روی هستند که سیستم آنها به دلیل تجمع روی در خاک قادر به تحمل آن نیست. در خاک های غنی از روی فقط تعداد محدودی از گیاهان شانس زنده ماندن دارند. به همین دلیل است که تنوع گیاهی زیادی در نزدیکی کارخانه های دفع روی وجود ندارد. روی به دلیل اثراتی که بر روی گیاهان دارد، تهدیدی جدی برای تولیدات زمین های کشاورزی است. با وجود این، کودهای حاوی روی همچنان استفاده می شود. در نهایت، روی می تواند فعالیت در خاک را قطع کند، زیرا بر فعالیت میکروارگانیسم ها و کرم های خاکی تأثیر منفی می گذارد. به همین دلیل

---

[1] Big Data
[2] Cloud
[3] Industrial Internet
[4] Horizontal and Vertical Integration
[5] Simulation
[6] Augmented Reality
[7] Additive Manufacturing
[8] Cyber Security and Advanced Manufacturing
[9] Circular products
[1] Jo˜ao

تجزیه مواد آلی ممکن است به طور جدی کند شود. ایران چهارمین تولیدکننده بزرگ ماده معدنی سرب و روی در آسیا بعد از چین ، قزاقستان و هند می باشد. همچنین از نظر تولید شمش روی جایگاه ششم را در آسیا دارا می باشد. با احداث کارنجات یکصد هزار تنی شمش روی در زنجان ، ایران نقش بارزی را در بازارهای جهانی ایفا خواهد نمود. معدن مهدی آباد نیز با ۲۰میلیون تن ذخیره ، یکی از کم نظیرترین معادن سرب و روی در جهان به جهت ذخیره معدنی اکسیده و سولفوره می باشد. اما دیلی پایین بودن عیار خاک آنکه حدود ۵ تا ۶ درصد است ، استفاده از آن برای تولیدکنندگان صرفه اقتصادی ندارد. معدن انگوران نیز منابع کافی را برای فعالیت در صنعت روی دارا است و با توجه به عیار بالای فلز آن ، از معادن کمیاب جهان است. بعد از مهدی آباد و انگوران ، معادن عمارت، کوشک و گوش فیل بزرگترین معادن سرب و روی ایران هستند.

در حال حاضر با رسیدن به حد اعلای فناوری‌های قبلی، صنایع ملی کشور از جمله صنعت روی به منظور تولید بیشتر و ارتقای کیفی محصولات، در مسیر استفاده از فناوری‌های حاصل از انقلاب چهارم قرار گرفته است. آشکار است که این موج عظیم تمام فرآیندها و زنجیره ارزش روی را تحت تاثیر قرار خواهد داد. بدون شک این رشد خیره‌کننده فناوری، فرصت‌های فراوانی را برای صنعت روی رقم خواهد زد تا با تاسیس کارخانه‌های هوشمند، دیجیتالیزه شدن این صنعت، رشد بهره‌وری، استفاده از فناوری پرینت سه‌بعدی در صنعت قطعه‌سازی و تعمیرات و نگهداری با تولید قطعات با استحکام بالا و وزن کمتر در کنار تحلیل‌های پیشرفته و حتی، فرآیند فروش و بازاریابی، تحول اساسی در صنعت و جامعه به‌وجود آورد. استفاده از سیستم یکپارچه مدیریت فرآیندی، انبارداری و سیستم هوشمند ارتباط با مشتری و فراتر از اینها استفاده از فناوری رباتیک در تولید، پیش روی صنعت روی است. انقلاب جدید با گسترش فناوری هوش مصنوعی و جاری‌سازی آن در صنعت و استفاده از فناوری‌های همزاد دیجیتال، افزایش استفاده گسترده از اینترنت اشیا، ربات‌های هوشمند با توانایی یادگیری و توسعه کنترل از راه دور توسط مدیران، صنعت روی و صنایع وابسته به آن را دگرگون می‌کند. از این دستاوردها می‌توان در ارتقای عملکرد و ضریب بازدهی تولید در کوره‌های بلند همراه با کاهش هزینه‌ها استفاده کرد. بدیهی است ورود صنعت روی به عصر انقلاب چهارم الزاماتی به همراه دارد. می‌توان گفت ورود محتوم به این عرصه با آمادگی و حرکت در مسیر اعمال کنترل هوشمند بر کل فرآیندها و استقرار فرآیندهای سازگار با محیط زیست همراه است تا بتواند شمش روی مطابق با نیازهای روز مصرف‌کننده را تولید کند. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی تأثیر ابعاد انقلاب صنعتی چهارم بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی در صنعت روی کشور است. با عنایت به اینکه هیچ پژوهشی تاکنون در این خصوص در صنعت مذکور صورت نگرفته است، ضرورت انجام این پژوهش را آشکار می‌کند. بدین منظور سوال اساسی این مقاله به این صورت مطرح می‌شود: "ابعاد کلیدی انقلاب صنعتی چهارم چه تأثیری بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی در صنعت روی دارد؟"
در ادامه، ابتدا به تحولات کلیدی انقلاب صنعتی چهارم پرداخته می‌شود و سپس پیشینه مطالعات مرتبط داخلی و خارجی ارائه شده و در انتها مدل مفهومی پژوهش آورده می‌شود.

۲- مبانی نظری، پیشینه و مدل مفهومی پژوهش

۲-۱- هوش مصنوعی[1]

مفهوم هوش مصنوعی شامل استفاده از مهارت های محاسباتی برای حل مسائل و دستیابی به اهداف است. مطالعات روی هوش مصنوعی برای پایداری عمدتاً بر روی پایداری زیست‌محیطی متمرکز شده‌اند و کاربرد هوش مصنوعی را برای بهبود تنوع زیستی با ارزیابی سیستم‌های اکوسیستم نشان می‌دهند. حفاظت از گونه‌های طبیعی و منابع آب در درجه اول، تمرکز بر روی صرفه جویی در انرژی و انرژی های تجدید پذیر بوده است. هوش مصنوعی به عنوان یک فناوری کلان داده که حجم زیادی از داده ها را جمع آوری، پردازش و ذخیره می کند و منبعی برای رقابت در صنعت است، استفاده شده است. یکی از بزرگترین چالش ها این است که چگونه می توان صنعت را با تولید پایدار منطبق کرد. در مورد شرکت های تولیدی، این شرکت ها مدیریت ایمن استفاده از مقادیر زیادی از مواد شیمیایی بسیار خطرناک برای محیط زیست را به دلیل تحمیل های محیط‌زیستی و ایمنی دشوار می دانند. علاوه بر این، تولید انبوه، عدم تشخیص زودهنگام ریسک و سیستم های تصمیم‌گیری ایمنی گرا در فرآیندها، تعدد اطلاعات و داده ها و طبقه بندی اطلاعات به صورت مجزا به عنوان مشکلات اصلی صنایع تولیدی از دستیابی به فرآیند تولید سبز شناسایی شدند. هوش مصنوعی می‌تواند به حل این مشکلات و تصمیم‌گیری از طریق تشخیص خطا، ادغام داده‌های متنوع و تشخیص زودهنگام موقعیت‌های هشدار کمک کند و شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا به تولید سبز دست یابند. مطالعات در مورد کاربرد هوش مصنوعی برای دستیابی به پایداری اجتماعی هنوز بسیار کمیاب است، حتی اگر برخی از نویسندگان آن را مناسب ترین نوع پایداری برای دستیابی بدانند. رفاه اجتماعی به عنوان شیوه‌های ایمنی و بهداشت و ارتقای حقوق بشر، شاخص‌های اجتماعی هستند که می‌توانند از طریق هوش مصنوعی در فرآیندهای تولید شرکت‌های تولیدی بهبود یابند، که می‌تواند تضمین کند که این نوع عملیات صنعت از نظر اجتماعی پایدار است. هوش مصنوعی می‌تواند پایداری اجتماعی را ارتقا دهد، یعنی زمانی که کارایی کار را افزایش می‌دهد، ساعات کار را کاهش می‌دهد، سلامت جسمی و روانی کارگران را بهبود می‌بخشد، امکان انجام چند کار را فراهم می‌کند، رویه‌های تکراری را خودکار می‌کند و اقدامات اجتماعی و اخلاقی را ترویج می‌کند. در این زمینه، ارزیابی اینکه چگونه شرکت‌های تولیدی می‌توانند از شاخص‌های پایداری هنگام پیاده‌سازی هوش مصنوعی بهره ببرند، مهم است (جوآئو و همکاران، ۲۰۲۳).

۲-۲- رایانش ابری[2]

طبق گفته کوسیاک[3](۲۰۱۸)، صنایع تولید هوشمند بر روی شش ستون بنا شده اند: فرآیندهای تولید تکنولوژیکی، مواد، داده ها، مهندسی نوع پیش بینی، پایداری و اشتراک منابع شبکه ای. اگرچه راه حل رایانش ابری به عنوان پشتیبان برای تصمیم گیری های هوشمند به منظور دستیابی به تولید پایدارتر و کارآمدتر استفاده شده است، کاربرد و اهداف آن در صنایع تولیدی هنوز نامشخص است. به این ترتیب، ارزیابی سهم کاربرد محاسبات ابری در پایداری محیطی در صنایع تولیدی مهم می‌شود. با این حال، اکثر مطالعات در مورد ارزیابی تاثیر رایانش ابری در صنعت ۴,۰ هنوز جنبه پایداری را برای ارزیابی عملکرد رایانش ابری، به‌ویژه در سطح اجتماعی در نظر نمی‌گیرند (آزادی[4]و همکاران، ۲۰۲۱). اخیراً، در صنایع تولیدی، مفهوم جدیدی از «تولید اجتماعی» پدیدار شده است که در آن تولیدکنندگان و افراد به روشی مشترک کار می کنند. رایانش ابری

[1] Artificial intelligence (AI)
[2] Cloud computing (CC)
[3] Kusiak
[4] Azadi

شامل یک سیستم شبکه ای است که دسترسی ساده، آسان و جامع به اطلاعات و داده ها را امکان پذیر می کند و با کاهش هزینه های عملیاتی و منابع فیزیکی و انسانی و تقویت فرصت‌های تجاری، ارزش افزوده ای را برای سازمان ها ایجاد می‌کند. رایانش ابری مفهوم تولید اجتماعی را با اجازه دادن و درمان داده‌ها و اطلاعات جمعی و شبیه‌سازی پروژه‌های نوآورانه‌تر تکمیل می‌کند که به عنوان راه‌حلی معرفی می‌شود که می‌تواند پایداری شرکت‌های تولیدی را ارتقا دهد. علاوه بر این، معرفی رایانش ابری در صنعت ۴/۰ و سایر فناوری‌ها، بازار کار را متحول می‌کند، زیرا مهاجرت به ابر هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دارد و جنبه اجتماعی آن توجه روزافزونی را به خود جلب می‌کند (محمد[1]و همکاران، ۲۰۲۰). رایانش ابری منجر به ناپدید شدن بسیاری از حرفه‌های سنتی می‌شود که با فناوری‌های هوشمند جایگزین می‌شوند، اما همچنین باعث می‌شود که متخصصان جدیدی با مهارت‌های خاص بر این فناوری‌های جدید ظهور کنند. این پیامدهای منفی اجرای رایانش ابری، به ویژه در شرکت‌های تولیدی با عملکردهای کاری استاندارد و نمونه‌سازی شده، سهم آن را در پایداری اجتماعی این بخش از فعالیت زیر سوال می‌برد (جوآئو و همکاران، ۲۰۲۳).

۲-۳- رباتیک[2]

کاربرد رباتیک در صنعت باعث کاهش هزینه های تولید، بهبود عملکرد صنعتی، برآورده کردن الزامات کیفیت ساخت، سفارشی کردن محصول، انعطاف پذیری بیشتر تولید و اعمال شیوه های پایدار شده است (گادالتا[3]و همکاران، ۲۰۱۹). در مورد صنایع تولیدی، رباتیک اجازه می دهد تا وظایف سریعتر انجام شود، کارگران را ماهرتر می کند، در زمان و هزینه صرفه جویی می کند. زمان نظارت را کاهش می دهد و بهره وری را افزایش می دهد. فرآیندهای تولید ۲۴ ساعته را امکان‌پذیر می کند، هزینه های تولید را کاهش می دهد، سیستم تولید را پایدارتر می کند و کیفیت محصول را بهبود می‌بخشد (انیوگاسی و بادوردین[4]، ۲۰۲۱).

با وجود سرمایه گذاری زیاد در پیاده سازی این راه حل دیجیتال، چندین مطالعه سهم کاربرد رباتیک در صنایع تولیدی را نشان داده است. برخی از این مطالعات، اجرای یک فرآیند تولید پایدارتر با کاهش مصرف برق، گاز و آب را برجسته کرده است، زیرا عملیات کارآمدتر، کاهش انتشار CO2، استفاده از مواد خام و کاهش ضایعات را به دنبال دارد (آجوانی- رمچندانی[5]و همکاران، ۲۰۲۱). از نظر اجتماعی، رباتیک در صنایع تولیدی می‌تواند شرایط کار انسان را با تغییر ساختارهای شغلی، کاهش وظایف معمول و یکنواخت، تقویت مهارت‌ها و صلاحیت‌های کارگران از طریق آموزش برای رسیدگی و مقابله با کاربردهای رباتیک، و تقویت شیوه‌های پایداری اجتماعی بهبود بخشد (رادیک[6]و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین افزودن رباتیک در صنایع تولیدی می تواند سلامت جسمی و روانی کارکنان، بهره‌وری کار، و حمایت از تصمیمات کاری بهتر را بهبود بخشد. علیرغم این مزایا، اجرای برنامه های رباتیک اغلب، اهداف پایداری اقتصادی دارد و از پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی غفلت می‌کند؛ مخصوصاً به این دلیل که رباتیک بسته به نحوه اجرای آن، تنها از نظر اجتماعی تأثیرات مثبتی ندارد. از طرفی، تقویت نابرابری ها، انحراف منابع از راه حل های قبلاً بهبودیافته، کاهش آزادی و حریم خصوصی از دست دادن شغل و افزایش بیکاری می‌تواند تهدیدهای ناشی از اجرای رباتیک باشد (گاجسک[7]و همکاران، ۲۰۲۰).

۲-٤- تحلیل کلان داده[8]

این فناوری، توانایی تولید و تجزیه و تحلیل سریع حجم زیادی از داده های متنوع را دارد و با پنج بعد مشخص می شود: تنوع، حجم، سرعت، ارزش و صحت (دوان و شیونگ[9]، ۲۰۱۵). تحلیل کلان داده را می توان به عنوان یک توانایی برتر سازمان‌ها، بر اساس شرایط عملکردشان، برای تحقق بخشیدن به ادغام منابع استراتژیک (مهارت های انسانی، مدیریتی و فنی) که می تواند عملکرد آنها را بهبود بخشد، تعریف کرد (وامبا[10]و همکاران، ۲۰۱۷). صنایع با بهره‌برداری از این قابلیت سازمانی برتر می‌توانند به مزیت رقابتی پایدار در سطوح محیطی و اجتماعی دست یابند (دوبی[11]و همکاران، ۲۰۱۹). در صنایع تولیدی، می‌تواند رویه‌های این شرکت‌ها را با پایدارتر کردن محیط‌زیست تغییر دهد. نشان داده شده است که این تحلیل به طور مثبت بر عملیات در سطح تولید پایدار (کائور و سینگ[12]، ۲۰۱۸) تأثیر مثبت می گذارد. هدف تولید پایدار، بهینه‌سازی استفاده از منابع، کاهش ضایعات، کربن و انتشار سمی و صرفه جویی در انرژی است (پیاتاناونگ[13]و همکاران، ۲۰۱۹). از نظر اجتماعی، تحلیل کلان داده می تواند مسائل مربوط به نیروی کار مانند عملکردهای انجام‌شده در زنجیره تأمین، استفاده از کار تکمیلی و مستمر، پرداخت غرامت و پردازش دستمزد، استانداردهای ایمنی و غیره را مدیریت و نظارت کند (ماگتو[14]، ۲۰۲۱).

۲-۵- فناوری بلاکچین[15]

---

[1] Mohammed
[2] Robotic
[3] Gadaleta
[4] Enyoghasi and Badurdeen
[5] Ajwani-Ramchandani
[6] Radi´
[7] Gaj˘sek
[8] Big data analytics (BDA)
[9] Duan and Xiong
[10] Wamba
[11] Dubey
[12] Kaur and Singh
[13] Piyathanavong
[14] Mageto
[15] Blockchain Technology

فناوری بلاک‌چین یک نوآوری است که مشخصه آن مخرب بودن و مبتنی بر پیشرفت های مستمر در محاسبات اطلاعاتی است که از یک عامل مرکزی استفاده می‌کند که داده ها را به روشی قابل اعتماد، شفاف و مشترک هماهنگ می کند و به طور فزاینده ای در صنعت ۴/۰ استفاده می‌شود. مطالعات اخیر در مورد ارتباط بین فناوری بلاک‌چین و پایداری عمدتاً بر مدیریت زنجیره تأمین، زیرساخت‌های فن‌آوری، انرژی، پول هوشمند، تغییرات آب و هوا و ادغام فناوری متمرکز شده‌اند. این فناوری می‌تواند مدل تولید پایدار را تسهیل کند، داده‌های مربوط به فعالیت‌هایی را که آلودگی و تخریب محیط‌زیست را افزایش می‌دهند مدیریت، نظارت و ذخیره کند و داده‌های بلادرنگ درباره فعالیت‌های سبز را جمع‌آوری کند و به تصمیم‌گیری مدیریت کمک کند (پارمنتولا[1]و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، می تواند به اجرای یک زنجیره تأمین سبز کمک کند (مورا[2]و همکاران، ۲۰۲۱).

۲-٦- اینترنت اشیا[3]

اینترنت اشیا، اصطلاح جدیدی است که به عنوان ارتباط اینترنت با دنیای فیزیکی که مجهز به حسگرها و محرک‌ها است، تعریف می‌شود. از طریق این ارتباط، تمام سیگنال‌های سیستم تولید فیزیکی را می‌توان به‌عنوان «داده‌های بزرگ» برای استفاده بعدی در فرآیندهای دیگر مانند ایجاد ارزش جدید، به‌ویژه در زمینه تغییر تقاضا برای خدمات نوآورانه و اشکال جدید اشتغال، پایش و ثبت کرد (اولا[4]و همکاران، ۲۰۲۰). ایده اصلی پشت مفهوم اینترنت اشیا، حضور فراگیر چیزها یا اشیاء مختلف است که می توانند با یکدیگر تعامل داشته باشند و به لطف طرح های آدرس‌دهی منحصر به فرد، با همسایگان خود برای دستیابی به اهداف مشترک همکاری کنند. اینترنت اشیا به عنوان دنیایی از اتصالات فراگیر توصیف شده است که در آن میزبان‌های دستگاه‌های فیزیکی مجهز به اینترنت دائماً بازخورد و اطلاعات ارزشمندی را ارائه می‌دهند. دستگاه حسگر که از دستگاه‌های فیزیکی مانند حسگرها، تراشه‌های RFID، بارکدها و سایر موارد فیزیکی متصل در شبکه اینترنت اشیا تشکیل شده است، بلوک اصلی معماری اینترنت اشیا است. این دستگاه ها داده‌ها را برای انتقال به لایه شبکه جمع‌آوری می‌کنند. اطلاعات از لایه ادراک به سیستم پردازش اطلاعات از طریق لایه شبکه که به عنوان یک رسانه انتقال عمل می کند، تحویل داده می شود (النهال[5]و همکاران، ۲۰۲۴).

۲-۷- پیشینه پژوهش

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که شرکت‌هایی که هدفشان دستیابی به پایداری زیست‌محیطی است، باید فناوری‌های صنعت ۴/۰ را پیاده‌سازی کنند (جوآئو و همکاران، ۲۰۲۳؛ جایاشری[6]و همکاران، ۲۰۲۲؛ کمبل[7]و همکاران، ۲۰۱۸؛ مولر[8]و همکاران، ۲۰۱۸).

اجلی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به بررسی تأثیر عملیات مدیریت زنجیره تأمین سبز بر همکاری محیطی و عملکرد پایداری با ترکیب تحلیل مسیر و تکنیک‌های تصمیم‌گیری پرداختند. خروجی تحلیل مسیر نشان داد که: "عملیات مدیریت زنجیره تأمین سبز تأثیر مثبت بر "عملکرد پایداری" و "همکاری محیطی" و همچنین "همکاری محیطی تأثیر مثبت بر عملکرد پایداری در شرکت پتروشیمی فناوران دارد". خروجی تکنیک سوارا حاکی از آن است که "معیار محیطی" با بیشترین وزن به عنوان مهم‌ترین معیار عملکردی پایداری در ارزیابی تأمین‌کنندگان شناسایی شده است. هم‌چنین "معیارهای اقتصادی" و "معیارهای اجتماعی" در رتبه‌های بعدی از نظر اهمیت قرار گرفتند. نهایتاً با به‌کارگیری تکنیک رتبه‌بندی ویکور، هفت تأمین‌کننده مواد شرکت موردارزیابی قرار گرفته و تأمین‌کنندگان از نظر عملکرد پایداری رتبه‌بندی شدند. یافته‌های این پژوهش به ویژه برای شرکت‌های تولیدی در توسعه همکاری محیطی با تأمین‌کنندگان آن‌ها به منظور دستیابی به عملکرد پایداری بسیار مفید است.

نوروززاده و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به بررسی تاثیر محیط‌زیستی و اجتماعی توسعه در شهر تهران پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد رابطه معناداری بین توسعه صنعت در تهران و آلودگی‌های زیست‌محیطی(افزایش زباله های الکترونیکی و غیرالکترونیکی، آلودگی هوا و ...) و اسکان غیررسمی وجود دارد. ولی با نابرابری اجتماعی(تضاد طبقات اجتماعی، نابرابری فرصت ها، برابری جنسیتی) رابطه معناداری ندارد.

علوی و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای به شناسایی و اولویت‌بندی پیشران های «ساخت و ساز چهار» در ایران برای افق زمان بیست‌ساله پرداختند. یافته‌های مطالعه نشان داد که دو پیشران «همکاری‌های علمی کشور با جهان پیشرفته» و «پیشرفت‌های فناورانه در عرصه‌های نوین» به عنوان اولویت اول انتخاب شدند، پنج پیشران به‌عنوان اولویت دوم و هشت پیشران در اولویت سوم قرار گرفتند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند برای ترسیم نقشه راه پیوستن کشورمان به جریان جدید ساخت و ساز چهار مورد استفاده قرار گیرد و برنامه های راهبردی و عملیاتی به منظور موفقیت صنعت ساختمان کشور در این عرصه را هدایت کند.

امینی و همکاران(۱۴۰۱) در مطالعه‌ای به طراحی مدل توسعه پایدار در صنعت خودرو ایران با رویکرد انقلاب صنعتی چهارم پرداختند. نتایج نشان داد که: ۱) بیشترین تأثیر را به ترتیب موانع سیاسی، فنی و اقتصادی بر پایداری و توسعه پایدار در صنعت دارند. ۲) ابعاد محیطی و اجتماعی به ترتیب بیشترین تأثیر را از موانع سیاسی و فنی می‌پذیرند. ۳) در بین فرصت‌های انقلاب صنعتی چهارم، فرصت‌های اطلاعاتی و تکنولوژیکی دارای بالاترین رتبه و مدیریت زنجیره تأمین دارای کمترین رتبه می‌باشد.

کارگر شورکی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی به بررسی شایستگی‌های پایداری دیجیتالی رهبران کسب و کار برای پیاده‌سازی نسل چهارم صنعت پرداختند. در این پژوهش از روش تحقیق معادلات ساختاری استفاده شده است. مدل انتخاب شده در پژوهش شامل ۱- بعد توانمندساز شایستگی های فکری، مدیریتی و هیجانی بوده و در بخش نتایج پایدار هم شامل پایداری اقتصادی، محیط زیستی، اجتماعی و کارکنان می باشد. نتایج کسب شده نشان می دهد که هر یک از ابعاد شایستگی با ابعاد نتایج پایداری

---

[1] Parmentola
[2] Mora
[3] Internet of Things (IOT)
[4] Olah
[5] Alnahhal
[6] Jayashree
[7] Kamble
[8] Müller

رابطه معنی دار دارد. اجلی و طبرزدی (۱۴۰۲) در پژوهشی به ارزیابی محرک‌های تولید سبز از دید خبرگان با هدف بهبود محیط‌زیست پرداختند. نتایج نهایی نشان داد که محرک «قوانین و مقررات» مهم‌ترین محرک، و محرک‌های «واردات فناوری» و «تعهد مدیریت ارشد» در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. محرک «تقاضای کارکنان» نیز با کمترین وزن به عنوان کم‌اهمیت‌ترین محرک شناسایی شد.

سعودی[1] و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به بررسی پایداری محیطی در انقلاب صنعتی چهارم با تأکید بر ارتباط بین محصول سبز و نوآوری فرآیند سبز شرکت‌های کوچک و متوسط تولیدی مالزی پرداختند. نتایج مدل‌سازی معادلات ساختاری تأیید می‌کند که نوآوری محصول سبز و نوآوری فرآیند سبز تأثیر مثبت و معناداری بر نوآوری پروژه دارند. علاوه بر این، نتایج بیشتر تایید می‌کند که نوآوری پروژه تأثیر مثبت و قابل‌توجهی بر عملکرد اقتصادی و محیط‌زیستی دارد. در نهایت، عملکرد اقتصادی و محیط‌زیستی تأثیر مثبت و معناداری بر مزیت رقابتی دارند. بنابراین، توصیه می شود که عامل صنعت ۴/۰، منبعی برای بهبود وضعیت اقتصادی و محیط‌زیستی شرکت‌ها در جهت کسب مزیت رقابتی باشد.

وسجا[2] و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی به توصیف ارتباط میان انقلاب صنعتی چهارم و شیوه‌های پایداری با استفاده از رویکرد تئوری و عملی تحلیل محتوای خودکار مقایسه‌ای پرداختند. این مقاله، امکان مقایسه سیستماتیک تری از منابع داده‌های مختلف را فراهم می کند. این مقاله نقطه شروعی را برای متخصصان توسعه پایدار فراهم می کند تا با کمک این تحلیل به بینش مفیدی در مورد یک زمینه خاص دست یابند.

جایاشری و همکاران (۲۰۲۱) رابطه بین پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴/۰ و اهداف پایداری محیطی را مطالعه کردند. نویسندگان نتیجه می‌گیرند که ویژگی‌های نوآوری فناوری تأثیر مثبتی بر اجرای صنعت ۴/۰ و اهداف پایداری محیطی دارد. جایاشری و همکاران (۲۰۲۲) پویایی را در اتخاذ صنعت ۴/۰ برای دستیابی به پایداری زیست محیطی تجزیه و تحلیل می‌کنند. نویسندگان بیان می‌کنند که رهبری مدیریت، پشتیبانی خارجی، کار تیمی و منابع فناوری اطلاعات برای پیاده‌سازی صنعت ۴/۰ و دستیابی به پایداری زیست‌محیطی مرتبط هستند.

ساتیرو[3] و همکاران (۲۰۲۲) با تجزیه و تحلیل تأثیرات اجتماعی بالقوه، چالش‌ها و مزایای اجرای صنعت ۴/۰ را شناسایی کرد. نویسندگان نتیجه می گیرند که صنعت ۴/۰ رقابت‌پذیری شرکت ها را افزایش داده و کیفیت خطوط تولید را بهبود بخشیده است. با این حال، آنها مشکلاتی را در تغییر فرهنگ سازمانی به دلیل دشواری استخدام/آموزش منابع انسانی در فناوری‌های دیجیتال و سرمایه‌گذاری بالایی که باید انجام شود، شناسایی کردند. نویسندگان همچنین بیان می‌کنند که پایداری محیطی در تدوین استراتژی‌های شرکت‌ها در درجه دوم اهمیت قرار می‌گیرد و بعد اجتماعی چندان مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

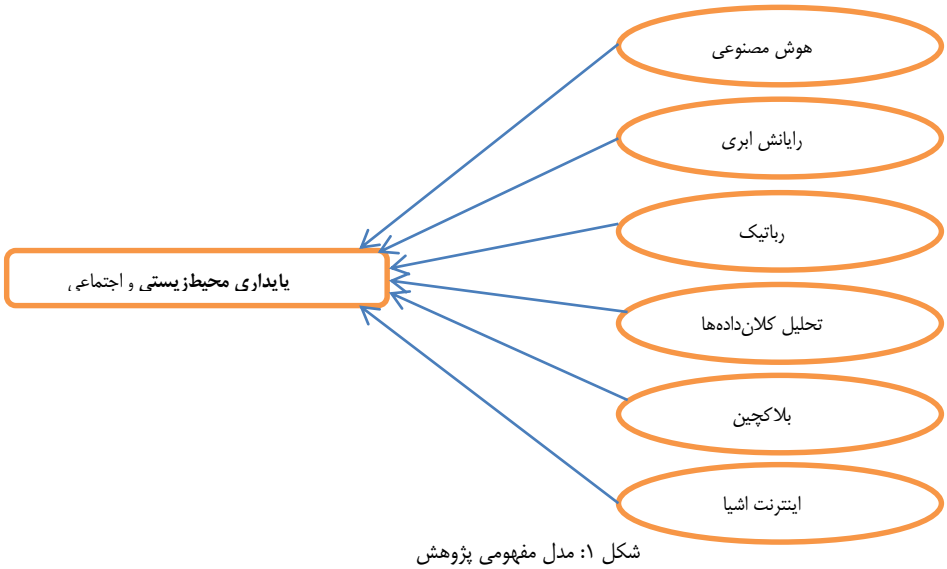
گریباوسکاس[4] و همکاران (۲۰۲۲)، از طریق بررسی سیستماتیک ادبیات دانشگاهی و خاکستری، پیامدهای اجتماعی صنعت ۴/۰ را تجزیه و تحلیل کرد. نویسندگان نتیجه می‌گیرند که صنعت ۴/۰ به مکانیسم های داخلی برای توسعه راه هایی برای دستیابی به پایداری اجتماعی نیاز دارد. نویسندگان همچنین بیان می‌کنند که صنعت ۴/۰ لزوماً مسئولیت اجتماعی شرکت را به کل زنجیره ارزش گسترش نمی‌دهد. علاوه بر این، در سناریوی صنعت ۴/۰ ، ارائه ارزش‌های توسعه اجتماعی هرگز جزو اهداف اصلی حاکمیت شرکتی نبوده است. سیکمن[5] و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی رابطه بین پایداری و انقلاب صنعتی چهارم با ارئه چارچوب نظارتی برای حسابداری توسعه فناوری پرداختند. در این مقاله، مفهوم انقلاب صنعتی چهارم و مفاهیم مرتبط با آن برای سنجش توسعه پایدار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. آنها بیان می‌دارندکه نوآوری های فناورانه می توانند نقش مهمی در مقابله با تحولات اشتباه گذشته داشته باشند و می توانند از روند تحول به سمت اقتصاد سبز در تعقیب اهداف توسعه پایدار حمایت کنند. از سوی دیگر، آن‌ها چالش‌هایی را برای کنترل اجتماعی فناوری ایجاد می‌کنند و معضل روشمندی را نشان می‌دهند. بیانیه اصلی این معضل این است که پیامدهای فناوری‌های جدید تنها زمانی به طور کامل قابل مشاهده خواهند بود که در سیستم های اجتماعی–اقتصادی–اکولوژیکی جاسازی شوند. بنابراین هدف اصلی این مطالعه، توسعه یک چارچوب نظارتی است که امکان ارزیابی پیش از پیش تغییرات تکنولوژیکی مرتبط و پیامدهای آنها برای توسعه پایدار را فراهم می‌کند.

دهمانی[6](۲۰۲۳) در مطالعه‌ای با مرور ادبیات، به بررسی تأثیر انقلاب صنعتی چهارم بر عملکرد و پایداری کسب و کار پرداختند. این مطالعه نشان می دهد که انقلاب صنعتی چهارم، فرصت های قابل توجه و قابل توجهی را برای بهبود عملکرد ارائه می دهد، به عنوان مثال از طریق اتوماسیون فرآیند، بهینه‌سازی زنجیره تامین و افزایش کارایی عملیاتی. علاوه بر این، شرکت هایی که به طور استراتژیک فناوری ها را ادغام می کنند، به احتمال زیاد از رشد پایدار، افزایش چابکی و نهایتاً افزایش رقابت سود می‌برند. این مرور ادبیات مبتنی بر رویکردی نظام‌مند به تحلیل آثار قدیمی و دانشگاهی و گزارش‌های مرتبط است. این تحقیق به مجلات دانشگاهی برای جمع‌آوری دیدگاه های گوناگون در مورد تأثیر انقلاب صنعتی چهارم متکی است. این تجزیه و تحلیل حول محورهای کلیدی مانند تحول دیجیتال، نوآوری تکنولوژیک، مدیریت تغییر و شرکت‌ها ساخته خواهد شد. النهال و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر فناوری های نوظهور صنعت ۴/۰ بر ابعاد پایداری پرداختند. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر فناوری‌های نوظهور در صنعت ۴/۰ بر ابعاد پایداری از طریق تجزیه و تحلیل یک مطالعه موردی انجام‌شده در دانشگاه پادشاه سعودی در مورد سیستم هوشمند پرکردن ماست است. در این سیستم از حیاتی‌ترین فناوری‌های نوظهور مانند اینترنت اشیا، چاپ سه‌بعدی، فناوری NFC[7] و Node-RED استفاده شد و یک چارچوب منحصربه‌فرد برای مطالعه ایجاد شد. این مطالعه اجرای موفقیت‌آمیز اهداف پایداری و چالش‌های پیش‌آمده در طول فرآیند را نشان داد. مطابق نتایج، فناوری‌های نوظهور صنعت ۴/۰، رضایت مشتری را افزایش می‌دهند، زمان و تلاش را کاهش می‌دهند، نرخ خطا را کاهش می‌دهند، بسیاری از انواع دیگر ضایعات را به حداقل می‌رسانند و امکان ارائه محصولات سفارشی به مشتریان را فراهم می‌کنند.

---

[1] Saudi
[2] Vasja
[3] Satyro
[4] Grybauskas
[5] Siekmann
[6] Dahmani
[77] Near field communication technology

آنها همچنین مداخله انسان را به حداقل نیازهای آن کاهش می دهند، ارگونومی را بهبود می بخشند و اشیاء فیزیکی-سایبری ارزشمند را برای همکاری یکپارچه در سرتاسر زنجیره ارزش به هم متصل می‌کنند. با عنایت به مرور ادبیات و پیشینه پژوهش، مدل مفهومی مطالعه حاضر به صورت شکل ۱ پیشنهاد می‌شود:



شکل ۱: مدل مفهومی پژوهش

با عنایت به مدل مفهومی پژوهش، فرضیه‌های زیر مطرح می‌شوند:

هوش مصنوعی تأثیر مثبت بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی در صنعت روی دارد.

رایانش ابری تأثیر مثبت بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی در صنعت روی دارد.

رباتیک تأثیر مثبت بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی در صنعت روی دارد.

تحلیل کلان‌داده‌ها تأثیر مثبت بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی در صنعت روی دارد.

بلاکچین تأثیر مثبت بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی در صنعت روی دارد.

اینترنت اشیا تأثیر مثبت بر پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی در صنعت روی دارد.

۳- مواد و روش‌ها

با عنایت به اینکه، نتایج این پژوهش می‌تواند در صنعت روی و سایر صنایع مرتبط استفاده شود، مطالعه از نوع کاربردی است. همچنین دارای رویکرد توصیفی- پیمایشی از نوع کمی است. جامعه آماری خبرگان، متخصصان صنعت روی به تعداد نامعلوم (به همین دلیل نامحدود فرض می‌شود) است که با توجه به جدول کوکران، ۳۸۴ نمونه درنظرگرفته شد که پرسشنامه‌ها به صروت آنلاین طراحی و در دسترس خبرگان قرار گرفت. در نهایت، نظرات ۴۱۰ نفر نمونه پس از تکمیل، موردتحلیل قرار گرفت.

در جدول ۱، وضعیت جمعیت‌شناختی (جنسیت، سن، تأهل، تحصیلات) پاسخ‌دهندگان به سوالات ارائه شده است:

جدول ۱: آمار توصیفی پاسخ‌دهندگان

جنسیت		
جنسیت	فراوانی	درصد
مذکر	۳۲۶	۷۹/۵۱
مونث	۸۴	۲۰/۴۹
جمع	۴۱۰	۱۰۰
سن پاسخ‌دهندگان		
سن	فراوانی	درصد
پایین‌تر از ۴۰ سال	۶۳	۱۵/۳۶
۴۰-۵۰ سال	۱۴۹	۳۶/۳۴
۵۰-۶۰ سال	۱۵۶	۳۸/۰۵
۶۰ سال و بالاتر	۴۲	۱۰/۲۴
جمع	۴۱۰	۱۰۰

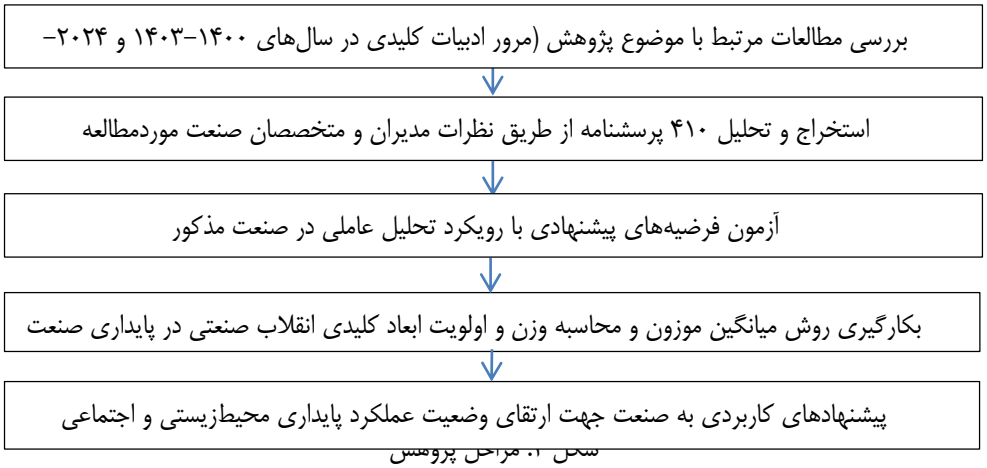
وضعیت تاهل پاسخ‌دهندگان		
وضعیت تاهل	فراوانی	درصد
مجرد	۲۱	۵/۱۲
متاهل	۳۸۹	۹۴/۸۸
جمع	۴۱۰	۱۰۰
سطح تحصیلات پاسخ‌دهندگان		
سطح تحصیلات	فراوانی	درصد
کارشناسی	۸۷	۲۱/۲۲
کارشناسی ارشد	۳۰۱	۷۵/۶۱
دکتری	۲۲	۵/۳۶
جمع	۴۱۰	۱۰۰

در این تحقیق، به منظور آزمون روایی پرسشنامه، از روایی محتوا بهره گرفته شد. جهت سنجش روایی محتوای سؤالات پرسشنامه از نظرات متخصصان، اساتید دانشگاهی و کارشناسان خبره صنعت روی استفاده شد و اشکالات پرسشنامه اصلاح شدند تا روایی لازم جهت توزیع و سنجش متغیرهای پژوهش را داشته باشند. در ادامه با بکارگیری نرم‌افزار اسمارت.پی.اس.اس.[۱] به محاسبه‌ی ضرایب مسیر و مقادیر T بین متغیرها و آزمون فرضیه‌ها پرداخته شد. مقادیر روایی و پایایی در جدول ۲ آمده است که حاکی از ضرایب مناسب مؤلفه‌های پژوهش دارد. به عبارت دیگر سازه‌ها و سوالات، از لحاظ اندازه‌گیری مفهوم مورد بررسی، مناسب هستند.

جدول ۲: ضرایب مؤلفه‌های مربوط به سازه‌ها

مؤلفه‌ها	آلفای کرونباخ	میانگین واریانس استخراجی[۲]	پایایی ترکیبی[۳]
هوش مصنوعی	۰/۷۱۱	۰/۷۴۶	۰/۷۵۹
رایانش ابری	۰/۷۳۲	۰/۷۶۱	۰/۷۷۶
رباتیک	۰/۶۸۷	۰/۷۰۳	۰/۷۳۸
تحلیل کلان داده‌ها	۰/۷۸۴	۰/۸۰۵	۰/۸۱۷
بلاکچین	۰/۷۶۹	۰/۷۹۲	۰/۸۱۹
اینترنت اشیا	۰/۷۵۳	۰/۷۸۴	۰/۸۰۳
پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی	۰/۷۰۲	۰/۷۲۵	۰/۷۴۸

همچنین به منظور ارزیابی و اولویت‌بندی ابعاد کلیدی انقلاب صنعتی چهارم از نظر اهمیت در اجرای آن در صنعت روی، از عقاید خبرگان با بکارگیری روش میانگین حسابی موزون[۴] با استفاده از پرسشنامه طیف پنج‌نقطه‌ای لیکرت بهره گرفته شد. شکل ۲، مراحل اجرایی این پژوهش را نشان می‌دهد:



شکل ۲: مراحل پژوهش

[۱] SPSS
[۲] AVE
[۳] CR
[4] Weighted mean

در روش میانگین حسابی موزون، هر شاخص در یک سطر پرسشنامه قرار داده می‌شود و طیف پنج‌نقطه‌ای (با امتیازهای خیلی کم: ۱؛ کم: ۲؛ متوسط: ۳؛ زیاد: ۴؛ و خیلی زیاد: ۵) در ستون قرار می‌گیرد و هر خبره یا تصمیم‌گیرنده، یک نسخه از پرسشنامه را با علامت‌زدن درجه اهمیت متناظر با هر شاخص تکمیل می‌کند.

٤- نتایج

٤-١- سنجش روایی واگرا

بنا به گفته فورنل و لارکر[۱](۱۹۸۱)، روایی واگرا زمانی مناسب است که مقدار میانگین واریانس استخراجی[۲]برای هر مؤلفه بیشتر از واریانس اشتراکی بین آن مؤلفه و سایر مؤلفه‌ها (مربع مقدار ضرایب همبستگی بین متغیرها) در مدل باشد. به عبارتی، مدل در صورتی روایی واگرای قابل‌قبول دارد که مقادیر قطر اصلی از مقادیر پایین خود بالاتر باشد (اجلی و رحمتی، ۱۴۰۳).

در جدول ۳، مقادیر روایی واگرا برای سازه‌های مدل ارائه شده است:

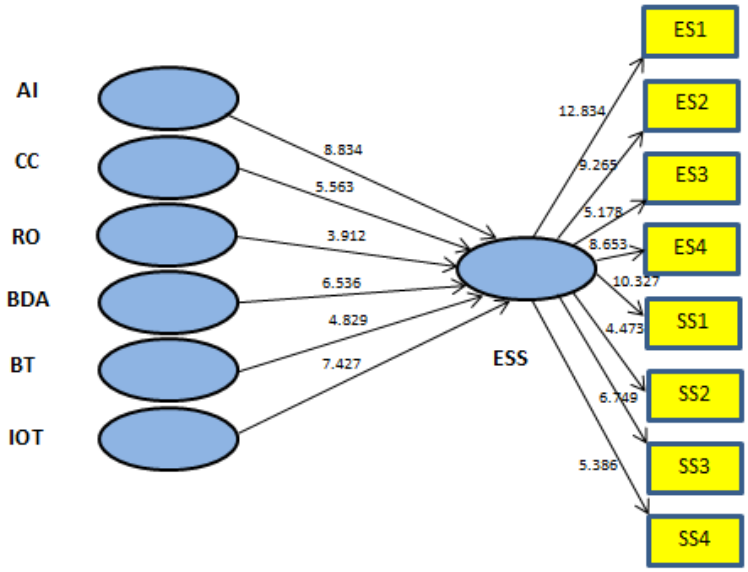
جدول ۳: مقادیر روایی واگرا

سازه‌ها	هوش مصنوعی	رایانش ابری	رباتیک	کلان داده‌ها	بلاکچین	اینترنت اشیا	پایداری
هوش مصنوعی	۰/۸۳۵						
رایانش ابری	۰/۷۳۲	۰/۸۴۶					
رباتیک	۰/۷۸۴	۰/۷۲۱	۰/۸۱۳				
تحلیل کلان داده‌ها	۰/۷۹۱	۰/۷۷۴	۰/۷۳۸	۰/۸۴۲			
بلاکچین	۰/۷۴۷	۰/۷۹۴۵	۰/۷۱۷	۰/۷۸۵	۰/۸۲۹		
اینترنت اشیا	۰/۷۲۹	۰/۷۱۵	۰/۷۳۹	۰/۷۶۱	۰/۷۴۷	۰/۸۰۷	
پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی	۰/۷۸۲	۰/۷۶۳	۰/۷۷۶	۰/۷۵۳	۰/۷۹۱	۰/۷۴۹	۰/۸۲۵

با عنایت به مقادیر جدول ۳ مشخص می‌شود که جذر میانگین واریانس استخراجی که بر روی قطر اصلی ماتریس وجود دارد از مقادیر زیرین هر سلول بیشتر است و بنابراین مدل روایی واگرای نسبتاً قابل قبولی دارد.

٤-٢- بررسی مدل ساختاری

در تحلیل عاملی، روابط بین متغیرها در یک‌جهت جریان می‌یابند و به‌عنوان مسیرهای متمایز در نظر گرفته می‌شوند. (اجلی و رحمتی، ۱۴۰۳). شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب مقادیر خروجی آزمون تی و ضرایب مسیر مدل موردمطالعه را نشان می‌دهد:

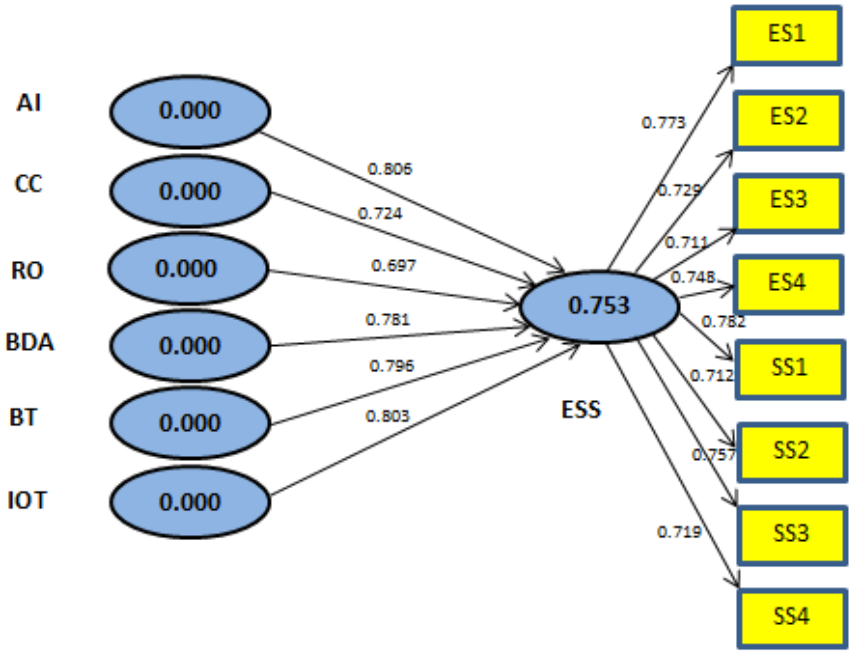


[۱] The Fornell-Larcker Criterion

[۲] AVE

شکل ۳: مقادیر T-value

همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر T-value برای تمامی بردارها از مقدار استاندارد قدرمطلق ۱/۹۶ بالاتر است و نشان‌دهنده آن است که مؤلفه‌های مربوطه، تأثیر قوی در سنجش سازه‌ها در صنعت دارند. لذا معنادار بودن همه سازه‌ها و روابط بین متغیرها در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید می‌شود و تمامی روابط، قابل‌قبول واقع شده و فرضیه‌های پژوهش تأیید می‌شوند. از طرفی نتایج (شکل ۴) نشان می‌دهد که روابط میان همه سازه‌های مدل از شدت بالایی برخوردار هستند:



شکل ۴: ضرایب مسیر و بارهای عاملی

همانطور که در شکل بالا ملاحظه می‌شود، ضرایب مسیر (با تأثیر مثبت و قوی همه مؤلفه‌ها در سنجش سازه‌ها) در صنعت قابل‌قبول است. مقادیر بارهای عاملی نیز بالاتر از ۰/۶ است (اجلی و رحمتی، ۱۴۰۳) و پایایی مدل اندازه‌گیری قابل‌قبول است. در جدول ۴، مجذور ضریب همبستگی چندگانه (ضریب تعیین[1]) برای تنها متغیر وابسته (درون‌زای) "پایداری محیطزیستی و اجتماعی"، برابر با ۰/۷۵۳ است که حاکی از برازش بسیار خوب مدل با داده‌ها است.

جدول ۴: مجذور ضریب همبستگی چندگانه (ضریب تعیین) در مدل

متغیر وابسته	ضریب تعیین
پایداری محیطزیستی و اجتماعی	۰/۷۵۳

در انتها، پس از اندازه‌گیری تمامی شاخص‌های برازش مدل‌های اندازه‌گیری و مدل ساختاری پژوهش، برازش کلی مدل (شاخص نیکویی برازش[2]) محاسبه شد. این شاخص دارای مقداری بین صفر تا یک است به طوری که هر چه به مقدار یک ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان از برازش کلی قوی مدل دارد. سه عدد ۰/۰۱، ۰/۲۵ و ۰/۳۶ که به عنوان مقادیر ضعیف، متوسط و قوی برای این شاخص اعلام شده است (داوری و رضازاده، ۱۳۹۳)، از جذر حاصلضرب مقادیر متوسط ضریب تعدیل و متوسط مقادیر افزونگی[3] برای سازه درونزای مدل حاصل می‌شود. همانطور که در خروجی نرم‌افزار مشاهده شد این مقدار برابر با ۰/۳۰۲ استخراج شد که مقدار خیلی خوبی است و حاکی از برازش قوی مدل ساختاری است و برازش کلی مدل نیز موردقبول واقع می‌شود.

٤-۳- آزمون کلی فرضیه‌های پژوهش

[1] R^2
[2] GOF
[3] Redundancy

آزمون کلی فرضیه‌های پژوهش در جدول ۵ ارائه گردیده است:

جدول ۵: خلاصهٔ نتایج آزمون فرضیه

فرضیه و مسیر مستقیم	ضریب مسیر	P-value	عدد معناداری (مقادیر تی)	نتیجه آزمون	نتیجه فرضیه
هوش مصنوعی ← پایداری محیطزیستی و اجتماعی	۰/۸۰۶	p<۰/۰۵	۸/۸۳۴	معنادار	تأیید
رایانش ابری ← پایداری محیطزیستی و اجتماعی	۰/۷۲۴	p<۰/۰۵	۵/۵۶۳	معنادار	تأیید
رباتیک ← پایداری محیطزیستی و اجتماعی	۰/۶۹۷	p<۰/۰۵	۳/۹۱۲	معنادار	تأیید
تحلیل کلان‌داده‌ها ← پایداری محیطزیستی و اجتماعی	۰/۷۸۱	p<۰/۰۵	۶/۵۳۶	معنادار	تأیید
بلاکچین ← پایداری محیطزیستی و اجتماعی	۰/۷۹۶	p<۰/۰۵	۴/۸۲۹	معنادار	تأیید
اینترنت اشیا ← پایداری محیطزیستی و اجتماعی	۰/۸۰۳	p<۰/۰۵	۷/۴۲۷	معنادار	تأیید

همانگونه که در جدول بالا ملاحظه می‌شود، روابط قوی میان سازه‌ها برقرار است و با توجه به ضرایب معناداری و مقادیر تی، تمامی فرضیه‌های پژوهش تأیید می‌شوند. به عبارتی تأثیر مثبت تمامی ابعاد انقلاب صنعتی چهارم بر پایداری محیطزیستی و اجتماعی صنعت روی قابل‌قبول واقع می‌شود.

٤-٤- رتبه‌بندی ابعاد کلیدی انقلاب صنعتی چهارم از نظر اهمیت در پایداری صنعت

پس از توزیع پرسشنامه میان خبرگان، پاسخ‌های تکمیلی آنها جمع‌آوری و به صورت خلاصه در جدول ۶ ارائه شده است:

جدول ۶: پاسخ‌های تکمیلی خبرگان

شاخص	عنوان شاخص	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	جمع	ارزش موزون	وزن شاخص	رتبه
		1	2	3	4	5				
D1	هوش مصنوعی	6	14	25	67	316	428	1957	0.192732	۱
D2	رایانش ابری	39	29	45	154	143	410	1563	0.153929	٥
D3	رباتیک	46	68	77	102	117	410	1406	0.138468	٦
D4	تحلیل کلان داده‌ها	23	8	58	194	127	410	1624	0.159937	٤
D5	بلاکچین	12	9	33	110	256	420	1849	0.182096	۲
D6	اینترنت اشیا	16	17	42	126	215	416	1755	0.172838	۳

٥- بحث و تحلیل داده‌ها

نوآوری‌های تکنولوژیکی در ۳۰ سال گذشته، انقلاب صنعتی چهارم را آغاز کرد. فن‌آوری‌های صنعت ۴/۰ به‌عنوان «سیستم‌های فن‌آوری» در حال تکامل درک می‌شوند که نوآوری‌ها را در زمینه‌های انتقال داده‌های دیجیتال، دستگاه‌های متصل هوشمند، محاسبات، فن‌آوری‌های ارتباطات و اتصال ترکیب می‌کنند و دامنه آن فراتر از بخش تولید بوده و شامل طیف گسترده‌ای از حوزه‌های مختلف فناوری مانند کشاورزی، بهداشت، خانه، زیرساخت و خدمات می‌شود. صنعت ۴/۰ به دلیل مزایایی که دارد، از جمله کاهش هزینه، افزایش کیفیت، عملکرد بالاتر، بهره‌وری بالاتر و بازده بالای سرمایه‌گذاری در بخش تولید مشهور شده است. این امر سیاست‌گذاران و کارشناسان را ترغیب کرد تا از صنعت ۴/۰ در عملیات روزانه خود استفاده کنند (اجلی، ۱۴۰۲). از ویژگی‌های انقلاب صنعتی چهارم، ادغام فناوری‌های جدید و تعامل آن‌ها در حوزه‌های دیجیتال، فیزیکی و بیولوژیکی، همراه با سرعت شتاب‌دهی نوآوری است. فناوری هایی مانند رایانش ابری، تحلیل کلان‌داده‌ها، یادگیری ماشینی، هوش مصنوعی، بلاکچین، رباتیک و اینترنت اشیا، زندگی روزمره مردم را از طریق محصولاتی مانند چاپگرهای سه‌بعدی، ماشین های الکتریکی، مالی دیجیتال و خرید آنلاین متحول می‌کنند انتظار می‌رود که صنعت ۴/۰، سیستم‌های اقتصادی و مالی ما را به روشی دیجیتالی و تکنولوژیکی به شدت متحول کند. چهارمین انقلاب صنعتی و محیط‌زیست، ابرروندهای مرتبط با هم هستند که می توانند به عنوان یک شمشیر دو لبه عمل کنند. انطباق نوآوری فناوری در سیستم اقتصادی و خدمات مالی می‌تواند به بهبود کیفیت محیطی کمک کند؛ از سوی دیگر، می‌تواند با افزایش تقاضا برای برق و تولید مقدار بیش از حد زباله‌های الکترونیکی به کیفیت محیط زیست آسیب برساند (محمد[1] و همکاران، ۲۰۲۲). در دهه‌های گذشته، تمرکز قابل‌توجه بسیاری از محققان و متخصصان بر تحول دیجیتال بوده است. تحول دیجیتال شامل تغییرات عمیقی است که در هر جنبه‌ای از جامعه، سازمان‌ها و صنایع از طریق استفاده از فناوری‌های دیجیتال مانند هوش مصنوعی، تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ، اینترنت اشیا، بلاکچین و سایر فناوری‌ها در حال رخ دادن است.

[1] Muhammad

از طرفی، پایداری محیطزیستی «به‌دنبال بهبود رفاه انسان با حفاظت از منابع مواد خام مورد استفاده برای نیازهای انسان و اطمینان از این است که از مخزن‌های زباله‌های انسانی بیشتر نشود تا از آسیب به انسان جلوگیری شود. پایداری محیطزیستی نیازمند تحقیقاتی است که با طیف وسیعی از مسائل محیطزیستی، از جمله آلودگی هوا و آب، مدیریت زباله، کاهش گازهای گلخانه‌ای، انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی، تغییرات آب و هوایی، حفظ تنوع زیستی و حفاظت از سایر منابع طبیعی سروکار دارد (ترونگ[1] ۲۰۲۲). بسیاری از مطالعات نشان می‌دهند که تحول دیجیتال و نوآوری می‌تواند به پایداری محیطزیستی کمک کند. محققان اندکی، اهمیت فزآینده پایداری را تشخیص داده و پتانسیل ابعاد انقلاب صنعتی چهارم را برای بهبود وضعیت پایداری محیطزیستی و اجتماعی صنایع بررسی کرده‌اند. با این حال، در هیچ مطالعه‌ای از تحقیقات به ارزیابی ابعاد انقلاب صنعتی چهارم از نظر اهمیت در بهبود وضعیت‌های پایداری صنعت روی پرداخته نشده است. همچنین بکارگیری همزمان تحلیل‌های آماری و تصمیم‌گیری از دیگر نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود. نتایج نهایی فرضیه‌ها، منبطق بر نتایج مطالعات صعودی و همکاران (۲۰۱۹)، وسجا و همکاران (۲۰۲۰)، جایاشری و همکاران (۲۰۲۱)، جایاشری و همکاران (۲۰۲۲)، ساتیرو و همکاران (۲۰۲۲)، گریباوسکاس و همکاران (۲۰۲۲)، سیکمن و همکاران (۲۰۲۳)، دهمانی (۲۰۲۳)، النهال و همکاران (۲۰۲۴) است.

٦- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مطالعه حاضر به بررسی تأثیر ابعاد انقلاب صنعتی چهارم بر پایداری محیطزیستی و اجتماعی در صنعت روی پرداخته شد. بدین منظور ابتدا به آزمون شش فرضیه پیشنهادی پژوهش پرداخته شد و تمامی فرضیه‌ها تأیید شدند و تأثیر مستقیم و قوی ابعاد انقلاب صنعتی چهارم بر پایداری محیطزیستی و اجتماعی صنعت روی آشکار شد. در ادامه به ارزیابی شش بعد کلیدی پژوهش با استفاده از روش وزن‌دهی میانگین موزون پرداخته شد.

نتیجه ارزیابی‌ها نشان داد که "هوش مصنوعی" با بیشترین وزن در رتبه اول، و ابعاد "فناوری بلاکچین" و "اینترنت اشیا" در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین بعد "رباتیک" با کمترین وزن در اولویت ششم اهمیت جای گرفت. پیشنهادهای کاربردی زیر به صنعت موردمطالعه ارائه می‌شود:

- هوش مصنوعی: هوش مصنوعی با رشد سریع خود، بزرگترین تأثیر را بر اقتصاد جهانی داشته است.این فناوری، نقش بسیار مهمی در دستیابی به پایداری محیطزیستی ایفا می‌کند (از پایان دادن به گرسنگی و فقر تا دستیابی به انرژی پایدار و برابری جنسیتی برای حفاظت و حفظ تنوع زیستی). با توجه به اینکه صنعت تولید روی یکی از بزرگترین صنایع ملی با آلایندگی بالا در کشور است، هوش مصنوعی در طیف وسیعی از بخش‌های محیطزیستی این صنعت کاربرد دارد که شامل حفاظت از منابع طبیعی، مدیریت انرژی، حفاظت از حیات‌وحش، کنترل آلودگی و کشاورزی، انرژی پاک و مدیریت پسماندهای روی می‌شود. از طرفی استفاده از فناوری یادگیری ماشینی یا فناوری برای شناسایی اشیا یا افراد می‌تواند در صنعت مؤثر واقع شود.
- بلاکچین: پشتیبانی مدیریت ارشد از بکارگیری این فناوری، به قابلیت ردیابی و تجارت محصولات، همکاری‌های قابل‌اعتماد و ایجاد قابلیت اطمینان در طول زنجیره همکاری صنعت، مشتریان و تأمین‌کنندگان، تقویت قراردادهای هوشمند، ایجاد شفافیت و قابلیت ممیزی در مورد مواد، محصولات و اطلاعات، عملیات سبز و .. به بهبود وضعیت پایداری صنعت کمک خواهد کرد. این فناوری برای دستیابی به توسعه پایدار صنعت روی از طریق راه‌حل‌های مختلف مانند تجارت اعتبار کربن، سیستم های انرژی و مدیریت زنجیره تامین مواد آلاینده این صنعت پیشنهاد می‌شود.
- اینترنت اشیا: استفاده از حسگرها و دیجیتالی‌سازی در ردیابی و نظارت بر داده‌ها در زمان واقعی، تجزیه و تحلیل، گزارش‌دهی و کنترل خودکار منابع انرژی، در دستیابی به کربن‌زدایی، بهره‌وری انرژی، برق‌رسانی و بهینه‌سازی غیرمتمرکز انرژی‌های تجدیدپذیر، محوری هستند و این موارد منجر به بهینه‌سازی کلیه فرآیندهای مرتبط با توسعه پایداری محیطزیستی و اجتماعی در صنعت می‌شود. همچنین برای ادغام موثر منابع انرژی پاک در زنجیره تامین صنعت و بهینه‌سازی مصرف انرژی، دیجیتالی‌کردن زنجیره تأمین انرژی تجدیدپذیر نقشی حیاتی در آینده صنعت ایفا می‌کند. از طرفی با توجه به مصرف بسیار بالای برق در صنعت روی، این فناوری می‌تواند چالش‌های پیش روی(انرژی خورشیدی) را برای دستیابی به استراتژی‌های توسعه پایدار صنعت حل کند.
- تحلیل کلان داده‌ها: تحلیل کلان داده می‌تواند نقشی حیاتی در پایداری محیطزیستی و اجتماعی ایفا کند؛ چرا که داده‌های بزرگ می‌تواند برای کمک به جهان در ارزیابی خطرات زیست محیطزیستی بسیار مفید باشد. با توجه به مصرف بالای آب توسط صنایع تولید شمش روی،، این تحلیل‌ها می‌توانند با دادن فرصت به بازار روی برای درک و تأمین بهتر تقاضای خود برای مواد، انرژی و آب، پایداری محیطزیستی و اجتماعی را فراهم کنند. در این زمینه، انعطاف‌پذیری تولید، قابلیت‌های مدیریتی و قابلیت‌های پرسنل می‌توانند تأثیر بسزایی در بهبود وضعیت پایداری صنعت داشته باشند.
- رایانش ابری: رایانش ابری راه‌حلی برای سیستم‌های اطلاعاتی است که بیشتر در عملکرد و مدیریت شرکت‌ها استفاده می‌شود. استفاده از راه‌حل‌های ارائه‌شده به عنوان بخشی از رایانش ابری، اجرای فرآیندهای تجاری در شرکت را تسهیل و تسریع می‌کند و بر نحوه اجرای مفروضات اصلی مفهوم توسعه پایدار تأثیر می‌گذارد. در حالی که در ابتدا، هدف اولیه صنایع در رایانش ابری، تأثیر مثبت آن از نظر فناوری و جنبه‌های اقتصادی است، امروزه راه‌حل‌های رایانش ابری بیشتر در چارچوب توسعه پایدار مورد توجه قرار می‌گیرند. به طور خلاصه، به کمک این فناوری و با بکارگیری مجموعه‌ای از ابزارها و برنامه‌های کاربردی، سیستم‌های توسعه اطلاعات و پردازش محاسبات سیستمی کارآمدتر شده و به بهبود پایداری محیطزیست و اجتماع منجر خواهد شد؛ به طوری که به بهبود بهره‌وری انرژی،

[1] Truong

کاهش انتشار کربن و پتانسیل یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر کمک کرده و مزایایی از جمله صرفه‌جویی در هزینه و بهبود دسترسی به فناوری در صنعت را تقویت می‌کند.

- رباتیک: ربات‌های صنعتی با خودکار کردن وظایف با دقت و کارایی، با به حداقل رساندن استفاده از منابع و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند و آنها را به متحدان ضروری در تلاش برای به‌حداقل‌رساندن ردپای اکولوژیکی خود تبدیل می‌کنند. ربات‌های صنعتی می‌توانند کیفیت محیطی را با کاهش ردپای اکولوژیکی در صنعت روی بهبود بخشند. استفاده از این فناوری در صنعت روی، موجب کاهش ضایعات و کاهش در مصرف انرژی می‌شود. سیستم‌های رباتیک را می‌توان طوری برنامه‌ریزی کرد که با حداقل ضایعات کار کنند و میزان مواد مصرفی در طول تولید را کاهش دهند. علاوه بر این، در سطوح بهینه انرژی کار کنند و اطمینان حاصل شود که از کمترین مقدار انرژی ممکن استفاده کنند. همچنین رباتیک با کاهش ضایعات و مصرف انرژی، به کاهش اثرات محیط‌زیستی در تولید شمش روی کمک می‌کند. این فناوری در بهبود ایمنی کارگران با کارهای تکراری فیزیکی بسیار مؤثر است به طوری که خطر آسیب، بیماری و هزینه مراقبت‌های بهداشتی کاهش یافته و رضایت بیشتر کارکنان را به دنبال خواهد داشت. کاهش مصرف آب و کاهش هزینه‌های حمل و نقل از دیگر مزیت‌های بکارگیری فناوری رباتیک در صنعت است.

همچنین صنعت روی می‌تواند از یازده عامل بحرانی موفقیت در توسعه انقلاب صنعتی چهارم به شرح ذیل بهره گرفته و با تقویت ابعاد کلیدی در جهت حفظ و بهبود پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی اقدام نماید (اجلی، ۱۴۰۲):

- **پشتیبانی و رهبری مدیریت:** برای همسویی با هدف صنعت، اجرای فناوری جدید، تعهد مدیریت ارشد و نگرش حمایتی نسبت به تدوین استراتژی ها و برنامه اقدام ضروری است.
- **زیرساخت اینترنت:** تجهیزات جانبی که به زیرساخت اینترنت کمک می‌کنند، شبکه‌های با تأخیر کم، سرورها، دستگاه‌های ذخیره‌سازی و پردازش داده، انتقال داده‌های مناسب و پروتکل‌های ارتباطی خوب هستند.
- **پشتیبانی مالی:** برای دستیابی به پیشرفت های فنی جدید در صنعت، باید حمایت مالی کافی و تخصیص بودجه به خدمات مورد نیاز اتخاذ شود.
- **امنیت داده:** ایجاد اعتماد بیشتر به فناوری مدرن، به اشتراک‌گذاری امن داده‌ها و رسیدگی به پتانسیل آن و کاهش نگرانی در مورد پیامدهای نامطلوب آینده آن.
- **همکاری و کار تیمی:** هماهنگی موثر، تبادل اطلاعات و همکاری بین اعضای زنجیره تامین بسیار حیاتی است.
- **سازگاری با مهارت‌های نیروی کار موجود:** برای کارکنان موجود جهت مدیریت زیرساخت‌های فناوری جدید، سازگاری کافی با مهارت‌های فنی انتظار می‌رود.
- **رقابت و فشار از طرف شریک تجاری:** رقابت و فشار بازار از طرف شرکای تجاری، صنعت را مجبور می‌کند تا اجرای فناوری خلاقانه را اتخاذ کنند.
- **سازگاری و در دسترس بودن سخت‌افزار و نرم‌افزار:** کیفیت بالا، سازگاری و در دسترس بودن سخت افزار و نرم‌افزار نقش مهمی در سازمان در توزیع داده‌ها و اطلاعات ایفا می‌کند.
- **حمایت‌های دولتی و حقوقی:** قوانین قانونی، مقررات و کمک‌های زیرساختی دولت‌ها به مبارزه با چالش‌هایی که صنعت در مسیر پذیرش صنعت ۴/۰ با آن مواجه است، کمک می‌کند.
- **انتظارات مشتری:** برای حفظ روابط خوب با مشتری بدون کاهش خدمات و کارایی، صنعت باید بر روی انتظارات مشتری تمرکز کند.
- **فناوری موجود مطابق با صنعت ٤/۰:** حسگرها و محرک‌ها، دستگاه‌های اینترنت اشیاء سهم قابل‌توجهی در سازگارکردن فناوری موجود با صنعت ۴/۰ خواهند داشت.

از پیشنهادهای علمی آینده مطالعه حاضر هم می‌توان به سایر تکنیک‌های وزن‌دهی اشاره کرد. بدین ترتیب به منظور وزن‌دهی و اولویت‌بندی ابعاد و مقایسه با نتایج تحلیلی پژوهش حاضر، می‌توان از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه مانند سوارا[1]، بهترین- بدترین[2]، آنتروپی شانون، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی[3] و ... استفاده کرد. از محدودیت‌های پژوهش حاضر آن است که این تحقیق در صنعت روی ایران انجام شده است. مشکل اصلی، محدودیت دردسترس‌بودن داده‌ها است. سطح همکاری و پاسخگویی متخصصان بسیار پایین بود. بنابراین برای مقایسه نتایج با سایر صنایع باید اطلاعات خاصی را که برای ارزیابی دقیقتر نتایج موردنیاز است به دست آورد. علاوه بر این، برای به دست آوردن نتایج تحقیقات بیشتر، می‌توان سایر ابعاد انقلاب صنعتی چهارم را برای دستیابی به مدل جامع‌تری بررسی کرد. علاوه بر این، پیامدهای این امر می‌تواند در بخش‌هایی مانند مس، فولاد، سرب، نفت و گاز، پتروشیمی، خودرو و غذا و مراقبت‌های بهداشتی مؤثر باشد.

منابع و مأخذ

[1] SWARA
[2] BWM
[3] AHP

امینی، سالار؛ رمضانی، مجتبی؛ بیک‌زاد، جعفر؛ سنگی نوپور، عباسقلی (۱۴۰۱). طراحی مدل توسعه پایدار در صنعت خودرو ایران با رویکرد انقلاب صنعتی چهارم، فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم‌های صنعتی، سال هفدهم، شماره ۶۱.

اجلی، مهدی؛ طبرزدی، امین (۱۴۰۲). ارزیابی محرک‌های تولید سبز از دید خبرگان با هدف بهبود محیط‌زیست. نشریه علمی محیط زیست و توسعه، ۱۴(۲۷)، ۳-۲۰.

حسین‌پور، عبدالکریم؛ قربان‌پور، احمد (۱۴۰۲). ارائه الگویی مبتنی بر ابعاد اقتصاد مدور، تولید پاک و انقلاب صنعتی نسل چهارم برای بهبود بهره‌وری پایدار صنایع تولیدی، اقتصاد مقداری، دوره ۲۰، شماره ۲، شماره پیاپی ۷۷، صفحه ۱۸۵-۱۶۵.

داوری، علی؛ رضازاده، آرش (۱۳۹۳). مدل‌سازی معادلات ساختاری با نرم‌افزار PLS، چاپ دوم، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی.

اجلی، مهدی؛ رحمتی، صاحبه (۱۴۰۳). تأثیر رهبری برندمحور مدیران ارشد بر روی تعهد به برند در بین کارکنان (موردمطالعه: بانک سرمایه کرج). فصلنامه بازیابی دانش و نظام‌های معنایی، ۱۱(۴۰)، ۱۴۳-۱۸۸.

علوی، سیدمهدی؛ ناصرصدرآبادی، علیرضا؛ زارع احمدآبادی، علیرضا؛ حسین بامکان، سیدمجتبی (۱۴۰۱). شناسایی و اولویت‌بندی پیشران های «ساخت و ساز چهار» در ایران برای افق زمان بیست ساله، آینده‌پژوهی ایران، دوره ۷، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۲، صفحه ۱۷۸-۱۵۹.

اجلی، مهدی (۱۴۰۲). ارزیابی و رتبه‌بندی عوامل کلیدی موفقیت در توسعه انقلاب صنعتی چهارم، پنجمین کنفرانس بین‌المللی محاسبات نرم، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، ۱۶-۱۷ اسفندماه.

کارگر شورکی، محمد؛ وارث، سیدحامد؛ غفاری، عباس (۱۴۰۱). شایستگی‌های پایداری دیجیتالی رهبران کسب و کار برای پیاده‌سازی نسل چهارم صنعت، فصلنامه علوم مدیریت ایران، سال هفدهم، شمارهٔ ۶۲، پاییز، صفحه ۱۳۳-۱۰۱.

اجلی، مهدی؛ نصیری، عباس؛ هدایتی، حسن (۱۴۰۰). تأثیر عملیات مدیریت زنجیره تأمین سبز بر همکاری محیطی و عملکرد پایداری با ترکیب تحلیل مسیر و تکنیک‌های تصمیم‌گیری. محیط‌زیست و توسعه فرابخشی، ۶ (۷۴)، ۷۷-۶۰.

نوروززاده، عباس؛ موغلی، مرضیه؛ خرم‌بخت، احمدعلی (۱۴۰۰). بررسی تاثیر زیست‌محیطی و اجتماعی توسعه صنعتی(مطالعه موردی: شهر تهران)، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره ۲۳، شماره ۵، شماره پیاپی ۱۰۸، صفحه ۱۲۳-۱۱۲.

Ajwani-Ramchandani, R., Figueira, S., Torres de Oliveira, R., Jha, S., (2021). Enhancing the circular and modified linear economy: the importance of blockchain for developing economies. Resour. Conserv. Recycl. 168, 105468 https://doi.org/ 10.1016/j.resconrec.2021.105468.

Alnahhal M., Saleem W., Salah B. (2024). The impact of emerging technologies of industry 4.0 on sustainability dimensions, Journal of Engineering Research, In Press, https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.07.023.

Azadi, M., Moghaddas, Z., Cheng, T.C.E., Farzipoor Saen, R., 2021. Assessing the sustainability of cloud computing service providers for Industry 4.0: a state-of-the-art analytical approach. Int. J. Prod. Res. 1–18. https://doi.org/10.1080/ 00207543.2021.1959666.

Dahmani, M. (2024). The Impact of the Fourth Industrial Revolution on Business Performance and Sustainability: A Literature Review. Theoretical Economics Letters, 14, 94-106. https://doi.org/10.4236/tel.2024.141006.

Duan, L., Xiong, Y., (2015). Big data analytics and business analytics. J. Manag. Anal. 2, 1–21. https://doi.org/10.1080/23270012.2015.1020891.

Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S.J., Papadopoulos, T., Luo, Z., Wamba, S.F., Roubaud, D., (2019). Can big data and predictive analytics improve social and environmental sustainability? Technol. Forecast. Soc. Change 144, 534–545. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.020.

Enyoghasi, C., Badurdeen, F., (2021). Industry 4.0 for sustainable manufacturing: opportunities at the product, process, and system levels. Resour. Conserv. Recycl. 166, 105362 https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105362.

Gadaleta, M., Pellicciari, M., Berselli, G., (2019). Optimization of the energy consumption of industrial robots for automatic code generation. Robot. Comput. Integrated Manuf. 57, 452–464. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.020.

Gaj˘sek, B., Stradovnik, S., Hace, A., (2020). Sustainable move towards flexible, robotic, human-involving workplace. Sustainability 12, 6590. https://doi.org/10.3390/ su12166590.

Grybauskas, A., Stefanini, A., Ghobakhloo, M., (2022). Social sustainability in the age of digitalization: a systematic literature Review on the social implications of industry 4.0. Technol. Soc. 70, 101997 https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101997.

Jayashree, S., Hassan Reza, M.N., Malarvizhi, C.A.N., Maheswari, H., Hosseini, Z., Kasim, A., (2021). The impact of technological innovation on industry 4.0 implementation and sustainability: an empirical study on Malaysian small and medium sized enterprises. Sustainability 13, 10115. https://doi.org/10.3390/.

Jayashree, S., Reza, M.N.H., Malarvizhi, C.A.N., Gunasekaran, A., Rauf, M.A., (2022). Testing an adoption model for Industry 4.0 and sustainability: a Malaysian scenario. Sustain. Prod. Consum. 31, 313–330. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.015.

João J. Ferreira, João M. Lopes, Sofia Gomes, Hussain G. Rammal (2023). Industry 4.0 implementation: Environmental and social sustainability in manufacturing multinational enterprises, Journal of Cleaner Production, Volume 404, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136841.

Kamble, S.S., Gunasekaran, A., Gawankar, S.A., (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. Process Saf. Environ. Protect. 117, 408–425. https://doi.org/10.1016/ j.psep.2018.05.009.

Kaur, H., Singh, S.P., (2018). Heuristic modeling for sustainable procurement and logistics in a supply chain using big data. Comput. Oper. Res. 98, 301–321. https://doi.org/ 10.1016/j.cor.2017.05.008.

Kusiak, A., (2018). Smart manufacturing. Int. J. Prod. Res. 56, 508–517. https://doi.org/ 10.1080/00207543.2017.1351644.

Mageto, J., (2021). Big data analytics in sustainable supply chain management: a focus on manufacturing supply chains. Sustainability 13, 7101. https://doi.org/10.3390/ su13137101.

Mohammed, F., Olayah, F., Ali, A., Gazem, N.A., (2020). The effect of cloud computing adoption on the sustainability of e-government services: a review. Int. J. Adv. Sci. Technol. 29, 2636–2642.

Mora, H., Mendoza-Tello, J.C., Varela-Guzm´an, E.G., Szymanski, J., 2021. Blockchain technologies to address smart city and society challenges. Comput. Hum. Behav. 122, 106854 https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106854.

Muhammad S., Pan Y., Magazzino C., Luo Y., Waqas M. (2022). The fourth industrial revolution and environmental efficiency: The role of fintech industry, Journal of Cleaner Production, Volume 381, Part 1,. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135196.

Müller, J.M., Kiel, D., Voigt, K.-I., (2018). What drives the implementation of industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. Sustainability 10, 247. https://doi.org/10.3390/su10010247.

Oláh J., Aburumman N., Popp J., Asif Khan M., Haddad H., and Kitukutha N. (2020). Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability, Sustainability 2020, 12(11), 4674; https://doi.org/10.3390/su12114674.

Parmentola, A., Petrillo, A., Tutore, I., De Felice, F., 2022. Is blockchain able to enhance environmental sustainability? A systematic review and research agenda from the perspective of Sustainable Development Goals (SDGs). Bus. Strat. Environ. 31, 194–217. https://doi.org/10.1002/bse.2882.

Piyathanavong, V., Garza-Reyes, J.A., Kumar, V., Maldonado-Guzm´an, G., Mangla, S.K., (2019). The adoption of operational environmental sustainability approaches in the Thai manufacturing sector. J. Clean. Prod. 220, 507–528. https://doi.org/10.1016/j. jclepro.2019.02.093.

Radi´c, I., Rupnik, B., ˇSinko, S., Kramberger, T., Gajˇsek, B., (2020). Redesign of the workplace for toolmakers towards industry 4.0. In: Karabegovi´c, I., Kovaˇcevi´c, A., Banjanovi´c-Mehmedovi´c, L., Daˇsi´c, P. (Eds.), Handbook of Research on Integrating Industry 4.0 in Business and Manufacturing. IGI Global, Hershey, PA, USA, pp. 492–511.

Satyro, W.C., de Almeida, C.M.V.B., Pinto Jr., M.J.A., Contador, J.C., Giannetti, B.F., de Lima, A.F., Fragomeni, M.A., (2022). Industry 4.0 implementation: the relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country. J. Clean. Prod. 337, 130456 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130456.

Saudi, Mohd Haizam Mohd/Sinaga, Obsatar et. al. (2019). Environmental sustainability in the fourth industrial revolution: the nexus between green product and green process innovation .In: International Journal of Energy Economics and Policy 9 (5), S. 363-370 http://econjournals.com/index.php/ijeep/article/download/8281/4533 . doi:10.32479/ijeep.8281.

Siekmann, F., Schlör, H. & Venghaus, S. (2023). Linking sustainability and the Fourth Industrial Revolution: a monitoring framework accounting for technological development. Energ Sustain Soc 13, 26. https://doi.org/10.1186/s13705-023-00405-4.

Truong T., C. (2022). The Impact of Digital Transformation on Environmental Sustainability, Hindawi, Advances in Multimedia, Volume 2022, Article ID 6324325, 12 pages. https://doi.org/10.1155/2022/6324325.

Vasja R., Oshane T., Mirjana P. B., Andrej J., Maja M. (2020). The Fourth Industrial Revolution and the Sustainability Practices: A Comparative Automated Content Analysis Approach of Theory and Practice, Sustainability 2020, 12(20), 8497; https://doi.org/10.3390/su12208497.

Wamba, S.F., Gunasekaran, A., Akter, S., Ren, S.J.F., Dubey, R., Childe, S.J., 2017. Big data analytics and firm performance: effects of dynamic capabilities. J. Bus. Res. 70, 356–365. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.009.