فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج
سال نوزدهم/ شماره ۶۷ / بهار ۱۴۰۳

سطح‌بندی فرصت‌های پایداری صنعت نسل٤ و دیجیتالی شدن با استفاده از تکنیک ساختاری تفسیری(ISM)

سیده خدیجه حسینی
دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
منصور مومنی (نویسنده مسؤل)
استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
Email: mmomeni@ut.ac.ir
علی حاجی غلام سریزدی
گروه سیستم دینامیک، دانشکده مدیریت، امام جواد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰ * تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

چکیده

انقلاب دیجیتال، یکی از اجزای مهم صنعت نسل ۴ اساساً شیوه زندگی و کار مردم را تغییر می‌دهد و افرادجامعه نسبت به فرصت‌هایی که صنعت ۴.۰ می‌تواند برای پایداری ارائه دهد خوشبین هستند. هدف این مقاله ارزیابی رابطه بین صنعت ۴. و فرصت‌های پایداری است که منجر به عملکرد بهتر مدیریت زنجیره تامین می‌گردد . همچنین به ذینفعان صنعت ۴.۰ و صنعت گران کمک می‌کند تا به وضوح بیشتر در مورد فرصت هایی که انقلاب دیجیتال می تواند برای پایداری ارائه دهد تامل کنند. برای رسیدن به این هدف در ابتدا به مرور ادبیات پژوهش پرداخته‌ایم و دریافتیم که برای صنعت نسل۴ تعداد ۲۴سازه پایداری وجود دارد. پس از بومی‌سازی شاخص‌ها به کمک روش دلفی فازی، یک ترکیب از روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) و رویکرد MICMAC به کمک نرم افزار متلب و اکسل برای ایجاد روابط متقابل و سطح‌بندی این معیارها در یک سلسله مراتب و مقایسه سطوح مختلف وابستگی و قدرت محرکه انجام شده است. این سطح‌بندی منجر به فهم بهتر عملکرد صنعت ۴ و تاثیر آن بر روی سه بعد مختلف پایداری شده است که مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر است. به عنوان نتیجه اصلی، مشخص شد که عملگرهای خود سازماندهی و سازگاری، تصمیم گیری آگاهانه، دیجیتالی شدن زنجیره ارزش و سیستم های هوشمند مدیریت انرژی در پایه مدل ساختاری ظاهر می‌شوند. مطالعه ما می‌تواند مبنایی برای تحقیقات تجربی آینده باشد تا بررسی کند که چگونه شرکت‌ها فناوری‌های صنعت ۴.۰ را در فرآیندهای خود ترکیب و اجرا کنند و چگونه این امر بر پایداری زنجیره‌های تامین تأثیر می‌گذارد.

کلمات کلیدی: انقلاب صنعتی چهارم، پایداری، دلفی فازی، روش ISM، روش MICMAC.

.

۱- مقدمه

با رشد فزاینده جمعیت انسانی، افزایش سطح تولید ناخالص داخلی و شیوه‌های زندگی مرفه‌تر، نژاد بشر بیشتر و بیشتر مصرف می کند که منجر به تقاضای رو به رشد مداوم برای منابع تجدیدپذیر و غیر قابل تجدید و درنهایت کمبود منابع می‌شود. این موضوع جای سوال دارد که آیا می‌توان رشد اقتصادی را در جهانی با منابع طبیعی محدود حفظ کرد یا خیر. حتی اگر امروزه اقتصاد هم از این حجم از مصرف حمایت کند، استانداردهای محیطی سخت‌تر، کمبود منابع و تغییر انتظارات مصرف‌کننده، سازمان‌ها را مجبور به یافتن جایگزین می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که صنعت نسل۴ پتانسیل بالایی برای اطمینان از اجرای روش‌های تولید پایدار داراست(Blunck & Werthmann, 2017). صنعت نسل۴ مانند یک انبار قابل اعتماد، تبادل اطلاعات و ارتباطات را در دسترس قرار می‌دهد. به مدیران کمک می‌کند تا به طور موثر هزینه‌ها را کاهش داده و رضایت مصرف‌کنندگان را افزایش دهند. از بعد اجتماعی موجب افزایش ارزش افزوده محصولات و خدمات، امکان ارائه آموزش‌های مفیدتر به کارکنان و هماهنگی بین حرفه و زندگی خانوادگی کارکنان می‌شود. در حالی‌که، ادبیات فاقد پژوهش‌های کافی شامل زنجیره‌های تامین پایدار و صنعت۴ است، مطالعات متعددی بر ابزارهای مربوط متمرکز شده است، نه بر روی عملگرهای آن و مطالعات کمی صنعت ۴.۰ را با توجه به مسائل پایداری مفهوم سازی کرده است(Xin et al., 2022). تولید هوشمند و تولید پایدار دو موضوع مهم در صنایع مدرن هستند. پایداری یکی از اهداف ضروری تولید هوشمند است که با توجه به مسائل زیست‌محیطی کنونی و مصرف منابع طبیعی، تلاقی‌های زیادی بین این دو وجود دارد. به عنوان مثال، یکی از ایده‌های اصلی تولید هوشمند، بهبود بهره‌وری انرژی است. بهبود بهره‌وری انرژی به معنای صرفه جویی بیشتر در انرژی و مصرف کمتر منابع طبیعی است. بنابراین، بهره‌وری انرژی نیز راه حلی برای پایداری است. با وجود در دسترس بودن تحقیقات غنی در هر دو حوزه، تعداد مقالات محدودی در تلاقی و بررسی همپوشانی تولید پایدار و ساخت هوشمند وجود دارد (Bai, et al., Luthra et al., 2020 Meng et al., 2018 2020). و تعداد تحقیقات برای بررسی و کاوش توانمندسازهای صنعت۴.۰ در جهت افزایش کارایی و عملکرد زنجیره تامین و اقتصاد دایره ای بسیار محدود است(Wiegand & Wynn, 2023 Shayganmehr et al., 2021). برنامه‌های صنعت نسل ۴، از طریق بهبود بهره‌وری و کیفیت محصول (بعد اقتصادی)، نظارت مداوم بر مصرف انرژی (بعد محیطزیست) و محیط کار ایمن‌تر، بار کاری کمتر و غنی‌سازی شغل (بعد اجتماعی) از پایداری پشتیبانی می‌کنند. یک خط مونتاژ کاملا یکپارچه به صورت دیجیتالی، فرآیند کامل تولید و طراحی محصول را ردیابی می‌کند. با شروع به استفاده از پرینت سه بعدی و CAD[1] برای توسعه نمونه‌های اولیه محصول جدید ، به طور مستمر در حال آزمایش مواد و مراحل تولید برای بررسی پیشرفت های تولید و تلاش برای کاهش عیوب محصولات هستند. انواع مختلف ربات‌ها کار سخت‌تر را به عهده می‌گیرند و کارگران به عنوان سرپرست عمل می‌کنند(Braccini & Margherita, 2018). سه بعد پایداری با جزئیات بیشتردر جدول۱ بیان شده اند(Stock et al., 2018).

جدول شماره (۱): ابعاد مختلف پایداری

بعد پایداری	توضیحات
محیطی	انرژی های تجدید ناپذیر باید در چرخه عمر محصول و مواد استفاده شوند. انرژی‌های تجدید ناپذیر باید جایگزین انرژی‌های تجدیدپذیر شوند و انرژی‌های تجدیدپذیر باید فقط تا حدی مصرف شوند که قابل استفاده مجدد باشد. بهره‌وری استفاده از منابع می‌تواند به طور قابل توجهی توسط زنجیره‌های تامین حلقه بسته با استفاده مجدد و بازیابی مورد بهره برداری قرار گیرد.
اجتماعی	آگاهی انسانها در تمام سطوح ثروت و تحصیلات، در مورد چالش پایداری باید تا حد زیادی افزایش یابد. ابزارهای یادگیری به عنوان مصنوعاتی برای ترکیب ارزش فیزیکی پایدار و انتقال آگاهی از طریق آموزش هستند. ایده‌های نوآورانه برای توسعه و ارزیابی محصولات و خدمات بر اساس معیارهای زیست محیطی و پایداری اجتماعی مورد نیاز است. این مفاهیم باید به همه شرکت کنندگان معرفی شده، درک شود و در سراسر جهان در زمینه‌های فرهنگی و آموزشی مختلف گسترش یابند.
اقتصادی	با فروش خدمات به جای محصولات ملموس می‌توان مزایای بیشتری برای افراد بیشتری بدون مصرف منابع فراهم کرد.

[1] . Computer-Aided Design

رویکرد فروش خدمات به جای فروش محصولات به کمک فناوری اطلاعات و ارتباطات با اشتراک گذاری دانش، تقاضا و عرضه‌ی بی‌درنگ را امکان‌پذیر می‌سازد. با استفاده از فناوری‌های لجستیک و اطلاعات، سیستم‌های خدمات محصولات، قابلیت‌هایی را با مشخصات مورد نیاز، در مکان مورد نیاز مرتبط با لجستیک ارائه می‌کنند. هزینه‌های فناوری‌های لجستیک و اطلاعات در این رابطه مقرون به صرفه‌تر از هزینه‌های موجودی انبار محصول در دوره‌های بیکاری هستند.

در جدول ۲ این پژوهش نمایی از توانمندسازهای صنعت نسل۴ شامل انواع فناوری‌های فعال‌کننده کلیدی مانند سیستم‌های فیزیکی سایبری، اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، تحلیل کلان‌داده‌ها، یادگیری ماشین به عنوان مشارکت‌کنندگان اصلی در محیط‌های تولید خودکار و دیجیتال که نتیجه آن پایداری و اقتصاد دایره‌ای است، فهرست شده است (Jamwal et al., 2021).

جدول شماره (۲): فناوری‌های مختلف انقلاب صنعتی چهارم در جهت پایداری

نام	تعریف	رفرنس
شبکه‌های‌عصبی مصنوعی[۲]	شبکه هایی که الگوهای مفیدی را برای ردیابی محصولاتی که به بازار عرضه می‌شوند، ارائه‌می دهند. همچنین با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مقدار مواد قابل بازیافت، قابل استفاده مجدد و باقیمانده را در فرآیندهای تولیدی تخمین می‌زنند. آنها همچنین به پیش بینی پایان عمر مواد (EoL[۳]) کمک کرده و از قابلیت پیش بینی خرید خرید محصول جدید پشتیبانی می‌کنند.	(Jamwal et al., 2021)
اتوماسیون[۴]	مجموعه‌ای از فناوری‌هایی که از حسگرها، اینترنت اشیا، فرکانس رادیویی (RFID) و غیره استفاده کرده و هدف آن به حداقل رساندن هزینه کل و مصرف انرژی الکتریکی توسط تجهیزات تولیدی است.	(Rajput & Singh, 2020)
اطلاعات بزرگ[۵]	سیستمی که ضمن کاهش حجم داده ها یک الگوی اطلاعات تولید کرده و امکان مجازی سازی داده ها را فراهم می‌کند. همچنین به ذخیره سازی ابری اطلاعات که از کارآمدترین و اقتصادی ترین راههای ذخیره اطلاعات است می‌پردازد. این فناوری از تولید پاک‌تر، کاهش انتشار کربن و کاهش زمان تولید (زمان ساخت) در چرخه‌های تولید پشتیبانی می‌کند.	(Rajput & Singh, 2020), (Suleiman et al., 2022), (Jamwal et al., 2021)
بلاک چین[۶]	کتاب‌های دیجیتالی که سوابق و معاملات رمزگذاری شده را نگه می‌دارند و توانایی عملکرد مستقل را بدون نیاز به ارتباط با سایر عوامل برای بررسی اعتبار تراکنش‌ها دارند. بلاک چین از شفافیت اطلاعات پشتیبانی کرده که این امر این فناوری را قابل اعتماد می‌کند. اطلاعاتی که ممکن است توسط این فناوری ارائه شود عبارتند از منبع مواد و محصول، عوامل درگیر، فرآیندها و مصرف انرژی. استفاده از این فناوری ها، با ایجاد سیستم های تراکنش شفاف و غیرمتمرکز نتایج برنامه های بازیافت و دایره‌ای را به حداکثر می‌رساند. و ابزارهای جدیدی را برای رسیدگی به مسائل پایداری، امنیت، کارایی و انعطاف پذیری سیستم ها ارائه می‌دهد.	(Ma et al., 2020) (Jamwal et al., 2021)
یادگیری عمیق[۷]	تکنیک محاسباتی که از چندین لایه پردازش برای یادگیری استفاده می کند. DL شبکه های عصبی که از سه لایه اصلی تشکیل شده اند را مدل می‌کند. استفاده از مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها برای مدل‌سازی، چشم‌اندازی نوآورانه برای قابلیت کاربرد در CE است.	(Akanbi et al., 2020)

[2] Artificial neural networks
[3] end-of-life
[4] Automation
[5] Big data.
[6] Blockchain
[7] Deep learning (DL)

دیجیتالی شدن[8]	این فناوری امکانات جدیدی را به مدیریت داده ها و شبکه های هوش مصنوعی در فرآیندهای تولید صنعتی اضافه کرده است و از طریق تولید داده، کاهش هزینه فرآیند، ایجاد اطلاعات دقیق در زمان واقعی در ارائه تصمیم‌گیری به CE کمک می‌کند.	(Rajput & Singh, 2020)
اینترنت اشیا (IoT)[9]	این فناوری از ترکیب و ارتباط دستگاه‌ها برای تولید داده‌ها، ارسال آنها به دستگاه‌های دیگر و سپس ارسال آنها به ابر استفاده می‌کند. این داده‌ها عموماً توسط حسگرهای هوشمند جمع‌آوری شده که باعث افزایش اعتبار در تصمیم‌گیری و حذف ناسازگاری‌ها می‌شوند. فناوری اینترنت اشیا را می توان برای نظارت بر وضعیت تجهیزات از یک مکان راه دور به کار گرفت. محصولات حساس به دما را می توان با سنسورها کنترل کرد و داده ها را از طریق اینترنت انتقال داد. به عنوان مثال، با استفاده از اینترنت اشیا، می‌توان اتلاف محصولات فاسد شدنی در هنگام حمل و نقل را به حداقل رساند زیرا وضعیت محصولات فاسد شدنی را نظارت کرده و گزارش را برای ذینفعان زنجیره تامین ارسال می‌کند.	(Rajput & Singh, 2020) (Suleiman et al., 2022) (Rajput & Singh, 2020) (Manavalan & Jayakrishna, 2019)
یادگیری ماشین[10]	فناوری که در آن رایانه‌ها توانایی یادگیری و پاسخ مورد انتظار را از طریق ارتباط داده‌های مختلف دارند. این داده ها می‌توانند تصاویر، اعداد، نقشه ها، تصاویر و غیره باشند. الگوریتم های یادگیری ماشین شبیه سازی های مبتنی بر داده هستند می توان از آن برای تولید حجم زیادی از داده ها استفاده کرد. ترکیبی از بهبود عوامل محیطی مانند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات قیمت، تاثیر قابل توجهی بر ترجیح مشتری دارد.	(Lieder et al., 2020) (Suleiman et al., 2022)
تولید افزودنی[11]	این فناوری که به عنوان چاپ سه بعدی نیز توصیف می‌شود، مجموعه‌ای از تکنیک‌هایی است که تولید مجموعه‌ای از کالاها را از طریق چینش لایه‌های مواد، یکی بر روی دیگری، به صورت پیوسته یا افزایشی، بر خلاف روش‌های ساخت سنتی، امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین می‌تواند از مدیریت چرخه عمر محصول و فرآیند پشتیبانی کند و سیستم‌های بازیافت فعلی را از طریق روش‌های پایدار جدید، مانند دیجیتالی کردن فرآیند تولید یا کمک به تولید مجدد اجزا یا محصول، به‌روزرسانی کند.	(Rosa et al., 2020) (Suleiman et al., 2022), (Jamwal et al., 2021)
ربات های خودمختار[12]	ماشین‌های هوشمندی که قادر به انجام وظایف محوله با حداقل مشارکت انسان هستند.	(Suleiman et al., 2022)
بهینه‌سازی و شبیه سازی[13]	تجزیه و تحلیل و آزمایش یک طراحی مبتنی بر مدل از سیستم‌ها، که در آن مدل کامپیوتری از ویژگی‌های مدل پیاده سازی شده تقلید می‌کند. این مدل کامپیوتری به اپراتورها اجازه می‌دهد تا قبل از تغییر فیزیکی، تنظیمات دستگاه را برای محصول بعدی خط تولید در دنیای مجازی آزمایش و بهینه‌سازی کرده در نتیجه کیفیت محصول را افزایش می‌دهند.	(Suleiman et al., 2022) (Kamble et al., 2018)
ادغام افقی و عمودی[14]	ادغام عمودی به معنای تعامل در سطوح مختلف ساختار مدیریت سلسله مراتبی در یک شرکت است، در حالی که ادغام افقی تمام بخش ها و طرف های خارجی و داخلی مرتبط با ایجاد زنجیره ارزش را در نظر می گیرد.	(Suleiman et al., 2022)
امنیت سایبری[15]	مجموعه‌ای از فناوری‌ها، فرآیندها و شیوه‌های دفاع از سیستم‌های تولیدی به هم پیوسته، در برابر حملات سایبری ، انتشار و هک داده‌های مهم و حساس است.	(Suleiman et al., 2022) (Kamble et al., 2018)
پرینت سه بعدی و واقعیت افزوده[16]	یک کپی پیشرفته از دنیای فیزیکی با استفاده از گرافیک کامپیوتری، صدا و سایر اطلاعات حسی می‌باشد. چاپ سه بعدی بر تولید افزودنی متکی است که با ایجاد لایه	(Suleiman et al., 2022) (Kamble et al., 2018)

[8] Digitalization
[9] Internet of Things
[10] Machine learning
[11] Additive manufacturing
[12] Autonomous robots
[13] Simulation
[14] Horizontal and vertical integration
[15] Cybersecurity

(AR)	های متوالی از مواد، محصولات نهایی را تشکیل داده است. بنابراین نیاز به مونتاژ قطعات و اجزا از بین می رود. یک نرم افزار طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) در پرینت سه بعدی برای تولید مدل دیجیتال استفاده می شود و به دنبال آن یک شی سه بعدی در یک چاپگر سه بعدی از مواد خام به صورت مایع یا ذره ایجاد می شود. لایه‌های نازکی از مواد خام به‌صورت میکروسکوپی توسط چاپگر رسوب می‌کنند تا لایه‌های متوالی در شکل‌گیری محصول نهایی با هم ترکیب شوند.	
رایانش ابری	رایانش ابری در Industry 4.0 را می توان یک عامل کلیدی در نظر گرفت که مزایایی مانند قدرت محاسباتی مورد نیاز برای فناوری های هوشمند ارائه می دهد.	(Jamwal et al., 2021)

برای روشن شدن شکاف تحقیقاتی، جدول ۳ پیشینه پژوهش و مطالعاتی که قبلاً منتشر شده را بررسی کرده است. استاک و سلیگر[۱۷](۲۰۱۶) پس از بررسی فرصت‌های پایداری صنعت نسل ۴ و ترسیم نقشه آن در سطح خرد و کلان به توسعه یک راه‌حل برای مقاوم سازی یک ماشین ابزار رومیزی پرداخته‌اند(Stock & Seliger, 2016). کمبل[۱۸] و همکاران(۲۰۱۸) ۸۵ مقاله منتخب را درچند دسته تحقیقاتی یعنی مقالات مفهومی در صنعت ۴.۰، تعاملات انسان و ماشین، تعاملات ماشین و تجهیزات، فناوری‌های صنعت ۴.۰ و پایداری طبقه‌بندی کردند. دالنگری و همکاران(۲۰۱۸) سهم Industry 4.0 را صرفا از نظر اقتصادی و بدون در نظر گرفتن سایر جنبه‌های پایداری در سطح شرکت‌ها به خوبی مطالعه و مستند کرده اند. ازتمل[۱۹] و گرسو[۲۰](۲۰۲۰) با بررسی ادبیات شواهد تجربی در مورد سهم صنعت ۴.۰ از منظر صرفا پایداری محیطی را ارائه می‌دهد. جایاکومار و همکاران(۲۰۲۰) نیز در مطالعه خود موارد استفاده مختلف از ابزارها و فناوری‌ها با تمرکز بر عملکردهای اقتصادی و زیست‌محیطی برای فعال کردن و انتقال به یک اقتصاد یکپارچه را در شرکت تولیدی لب‌تاب تشریح کردند. بشتانیک[۲۱] و همکاران(۲۰۲۰) دستاوردهای توسعه پایدار توسط کشورهای اتحادیه اروپا را در شرایط صنعت ۴.۰ ارزیابی نمودند. واچی[۲۲] و همکاران(۲۰۲۱) نیز تنها بعد زیست محیطی پایداری را بدون در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی و اجتماعی مورد توجه قرار داده‌اند. ماچادو[۲۳] و همکاران(۲۰۲۱) به شناسایی موانع اصلی و توانمندسازها برای ادغام I4.0 و پایداری در زنجیره تامین شرکت‌های کوچک و متوسط پرداخته و سپس با تجزیه و تحلیل تأثیر بین این موانع و توانمندسازها از طریق منطق فازی و تکنیک دیمتل[۲۴]، برجسته‌ترین آنها را شناسایی کردند. راجپوت و سینگ (۲۰۲۲) به کمک مدل‌سازی ریاضی و استقرار حسگرهای IoT برای گرفتن اطلاعات بلادرنگ تولید با افزایش شفافیت و با در نظر گرفتن لجستیک معکوس ارزش و پایداری را تضمین می‌کنند. شارما [۲۵]و همکاران(۲۰۲۳) با به‌کارگیری فناوری بینایی کامپیوتری[۲۶] و خودکارسازی در اقتصاد نوظهور هند، سیستم مدیریت الکترونیکی زباله‌ها را بررسی کرده‌اند. روابط متقابل پیچیده بین پانزده توانمندساز شناسایی و با تکنیک مدل‌سازی تفسیری و دیمتل تجزیه و تحلیل می‌شود. کمبل و همکاران(۲۰۲۳) بر اساس نگرش مدیران صنعت خودروسازی هند از بعد فقط اقتصادی به بررسی تاثیر بلاک‌چین بر پایداری پرداختند و به جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی صنعت نسل۴ توجهی نکردند. ماوار و پارس‌لی[۲۷](۲۰۲۳) نشان دادند که صنعت نسل۴ به صورت مستقیم بر تولیدناب و به‌طور غیرمستقیم بر پایداری تاثیر مثبت دارد. تسلیمی و همکاران(۱۴۰۲) با بررسی نقش اینترنت اشیا در صنعت خودرو به کمک ده نفر از خبرگان و تمرکز بر یک بعد یعنی

[16] Augmented reality
[17] Stock, Seliger
[18] Kamble
[19] Oztemel
[20] Gursev
[21] Bashtannyk
[22] Vacchi
[23] Machado
[24] DEMATEL
[25] Sharma
[26] Computer vision technology
[27] Maware and Parsley

مهارت‌ها و مشخصه‌های نیروی کار، به تفکیک متغیرها به علی و معلول وسطح‌بندی آن‌ها پرداخته است و به جنبه‌های زیستمحیطی و اقتصادی توجهی نکرده است. حسین‌پور و همکاران(۱۴۰۰) نیز در پژوهش خود بیشتر به شاخص‌های زیست محیطی توجه داشته‌اند. بر اساس بررسی ادبیات، نویسندگان این پژوهش شکاف‌های زیر را شناسایی کرده‌اند: بیشتر مطالعات مسائل و ویژگی‌های مربوط به صنعت ۴.۰ یا پایداری را تحلیل کرده‌اند و کمتر مقاله‌ای به ارتباط آن‌ها با یکدیگر از هر سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پرداخته است. بنابراین، مطالعه‌ای جهت ادغام مفاهیم صنعت ۴.۰ با پایداری و معرفی عملگرهای مختلف صنعت نسل ۴ در سه بعد مختلف پایداری یک ضرورت برای سازمان‌هایی است که نیاز به دانستن نتایج پایداری به کمک صنعت نسل۴ را دارند.

جدول شماره (۳): مرور پژوهش‌های پیشین

عنوان پژوهش	تکنولوژی	صنعت	تکنیک	نتایج	رفرنس
فرصت‌های تولید پایدار در صنعت ۴.۰	فناوری‌های مختلف	ماشین‌ابزار	مطالعه‌موردی	فرصت‌های تولید پایدار را برای چشم انداز کلان و خرد صنعت ۴.۰ خلاصه می کند. و مهمترین رویکردهای تولید پایدار در ادبیات فعلی را با روندها و تحولات مربوط به صنعت ۴.۰ ادغام می کند.	(Stock & Seliger, 2016)
چارچوب صنعت پایدار ۴.۰: مروری بر ادبیات سیستماتیک با شناسایی روندهای فعلی و چشم اندازهای آینده	فناوری‌های مختلف	صنایع مختلف	مرور ادبیات	یک چارچوب صنعت ۴.۰ پایدار را با سه مؤلفه مهم یعنی فناوری‌های صنعت ۴.۰، یکپارچه‌سازی فرآیند و نتایج پایدار پیشنهاد می‌کند.	(Kamble et al., 2018)
سهم مورد انتظار فناوری‌های Industry 4.0 برای عملکرد صنعتی	فناوری‌های مختلف	صنایع برزیل	تحلیل رگرسیون	فناوری‌های مختلف صنعت ۴.۰، مزایای مختلفی جهت طراحی محصول، بهینه‌سازی تولید و جنبه‌های دیگر داراست.	(Dalenogare et al., 2018)
چارچوبی برای ارزیابی پایداری چرخه عمر محصول از طریق تولید افزودنی	تولید افزودنی	صنایع مختلف	مرور ادبیات	تاثیر تولید افزودنی بر سه بعد پایداری را با ابزار نقشه‌برداری بررسی نمود.	(Ribeiro et al., 2020)
توسعه مالی، اقتصادی و پایداری دولت‌ها در چارچوب صنعت ۴.۰	فناوری‌های مختلف	کشورهای اتحادیه	مرور ادبیات	مفهوم دستیابی به توسعه پایدار را از	(Bashtannyk et al., 2020)

			اروپا	طریق توسعه بخش فناوری در کشورهای اتحادیه اروپا بررسی کرده است.	
بررسی ادبیات Industry 4.0 و فناوری های مرتبط	فناوری‌های مختلف	صنایع مختلف	مرور ادبیات	ویژگی‌ها و محتوای Industry 4.0 را برای تغییر از تولید ماشینی به تولید دیجیتال با یک نقشه راه نشات می‌دهد.	(Oztemel & Gursev, 2020)
مدل سازی شبکه ها در اقتصاد دایره ای	فناوری‌های مختلف	الکترونیک هند	مدل برنامه ریزی خطی اعداد صحیح مختلط چند هدفه	این مطالعه رابطه معکوس بین سود اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.	(Jayakumar et al., 2020)
صنعت ۴.۰ و داده‌های هوشمند به عنوان توانمندسازهای اقتصاد دایره‌ای در تولید: مهندسی مجدد محصول با طراحی دایره ای	داده‌های بزرگ	کاشی و سزامیک ایتالیا	فرضیه نظری	فناوری‌های Industry 4.0 و داده‌های هوشمند را برای توسعه و به‌کارگیری یک مدل دایره‌ای ادغام می‌کند.	(Vacchi et al., 2021)
موانع و توانمندسازهای ادغام صنعت ۴.۰ و پایداری در زنجیره تامین شرکت‌های کوچک و متوسط	فناوری‌های مختلف	شرکت‌های متوسط و کوچک	دیمتل فازی	هشت مانع و هشت عامل توانمندساز و رابطه علت و معلولی مربوطه را نشان می‌دهد.	(Machado et al., 2021)
مدل صنعت ۴.۰ برای شبکه لجستیک معکوس- اقتصاد دایره ای یکپارچه	اینترنت اشیا	شرکت‌های تولیدی	مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	بهینه سازی هزینه و به حداکثر رساندن عمر محصولات برای ایجاد تسهیلات Industry 4.0 با یک شبکه اقتصاد دایره ای و شبکه لجستیک معکوس .	(Rajput & Singh, 2022)
توانمندسازی فناوری بینایی کامپیوتری برای مدیریت پایدار الکترونیکی زباله ها	فناوری بینایی کامپیوتری	شرکت‌های مدیریت زباله هند	ISM و تکنیک دیمتل	پس از بررسی روابط علی و معلولی بین ۱۵ توانمندساز، پایداری	(Sharma et al., 2023)

				را به عنوان مهم‌ترین معیار در مدیریت الکترونیکی زباله‌ها نشان می‌دهد. سایر عوامل مهم عبارتند از سازگاری و قابلیت اطمینان، کاهش هزینه، کنترل کیفیت و مدیریت ایمنی.	
آیا صنعت ۴.۰ می تواند به تولید ناب در دستیابی به پایداری در طول زمان کمک کند؟ سازمان های ایالات متحده	فناوری‌های مختلف	صنایع مختلف تولیدی ایالات متحده	مدلسازی معادلات ساختاری	تاثیر غیر مستقیم صنعت نسل ۴ بر تولید ناب و پایداری تایید میشود.	(Maware & Parsley, 2023)
تاثیر فناوری بلاک چین بر یکپارچگی زنجیره تامین و عملکرد زنجیره تامین پایدار: صنعت خودرو	بلاک‌چین	خودروی هند	معادلات‌ساختاری	از این فرضیه که بلاک‌چین به طور مثبت بر پایداری زنجیره تامین تأثیر می گذارد حمایت می کند.	(Kamble et al., 2023)
مدل ساختاری تحلیل مولفه های نوین نیروی کار در صنعت خودرو با ملاحظه اینترنت اشیاء صنعتی	اینترنت اشیا	خودروی ایران	دلفی‌فازی، دیمتل‌تجدیدنظر شده و ISM	معیارهای پشتیبانی مدیریت، هماهنگی و یکپارچگی فناوری، مهارت ارتباطی، رهبری، مدیریت ریسک و بحران و تجربه ی کاری مرتبط معیارهای علی می‌باشند و معیارهای سطح عملکرد کارکنان، ارزش و باور و فرهنگ کار، استفاده از تکنولوژی دیجیتال و انعطاف پذیری با تغییر شرایط، معیارهای معلول می باشند؛	(Taslimi et al., 2023)
ارائه الگویی مبتنی بر ابعاد اقتصاد مدور، تولید پاک و انقلاب صنعتی نسل چهارم برای بهبود بهره‌وری	فناوری‌های مختلف	صنایع مختلف تولیدی	سوآرای‌فازی	تولید پاک و اقتصاد مدور به ترتیب بالاترین اهمیت	(Hosseinpoor et al., 2023)

پایدار صنایع تولیدی	نسبی را بهبود عمکرد پایدار دارند.

مطالعه حاضر این شکاف دانش را با توسعه یک نقشه راه و توضیح اینکه چگونه صنعت ۴.۰ و فناوری‌های دیجیتالی زیربنایی تولید پایدار را تسهیل می‌کنند، پر می‌کند. در ادامه این مقاله، ابتدا ویژگی‌های تولید پایدار ارائه شده و سپس تولید هوشمند معرفی می‌شود. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه ارزیابی رابطه بین صنعت نسل۴ و پایداری است. در واقع، ما به دنبال پاسخ به سه سوال مجزا هستیم:

سوال ۱: عملگرهای صنعت نسل ۴ که منجر به پایداری زنجیره تامین می‌گردند چه چیزهایی هستند؟

سوال ۲: عملگرهای موثر صنعت نسل ۴ که منجر به پایداری زنجیره تامین می‌گردند چه چیزهایی هستند؟

سوال ۳: رابطه سلسله مراتبی و سطح‌بندی این عملگرها به چه صورت است؟

برای پرداختن به این سؤالات تحقیق، ما از رویکرد تصمیم گیری چند معیاره (MCDM[۲۸])استفاده کرده ایم. در این راستا، یک فهرست اولیه از عملگرها را با مرور و تجزیه و تحلیلی بر ادبیات سیستماتیک و کارکردهای آن ارائه می‌کند. سپس در مرحله بعد از طریق روش دلفی فازی مرتبط‌ترین آن‌ها را انتخاب کرده و به سوال اول و دوم پاسخ می‌دهد. سپس با گرفتن نظرات کارشناسان و با استفاده از روش ISM[۲۹] ، مدل سازی، سطح‌بندی و بررسی رابطه بین محرک‌ها را انجام می‌دهد. پس از معرفی یک مدل مفهومی پایه به سوال سوم پاسخ داده وتوضیح می‌دهد چگونه فناوری‌های صنعت ۴.۰ می‌توانند به TBL[۳۰] تولید پایدار کمک کنند. در مرحله بعدی با تجزیه و تحلیل MICMAC قدرت محرک و وابستگی عملکردهای پایداری را به دست می‌آورد. در نهایت، یافته‌ها را مورد بحث قرار می‌دهد.

۲- روش‌شناسی

پژوهش حاضر به دنبال شناسایی عملکردهای پایداری صنعت ۴.۰ و روابط متقابل بین آنها، در سال۱۴۰۲ می باشد. برای شناسایی کارکردهای صنعت ۴.۰ جهت حصول پایداری، یک بررسی و تجزیه و تحلیل مبتنی بر محتوای پیشرفته از ادبیات انجام شده‌است. شکل ۱ یک نمایش شماتیک از مراحل انجام پژوهش را ارائه می‌دهد. در مرحله اول از جستجوی پیشرفته، بررسی ادبیات با شناسایی ترکیبات مختلف کلمات کلیدی مرتبط با صنعت ۴.۰ و مفهوم پایداری طراحی و اجرا شد. کلماتی مانند"انقلاب صنعتی چهارم"، «اینترنت صنعتی» و «تولید هوشمند» « اینترنت اشیاء صنعتی» و «سیستم‌های فیزیکی–سایبری» به‌عنوان بلوک‌های سازنده مهم انقلاب صنعتی چهارم بررسی شده است وکلیدواژه مرتبط با پایداری شامل «پایداری»، «پایداری اقتصادی»، «پایداری محیطی» و «پایداری اجتماعی» بررسی شده است. جستجو اولیه در پایگاه‌های داده آنلاین معتبر مانند Elsevier، Emerald، IEEE Xplore، Inderscience، John Wiley & Sons، Springer و Taylor & Francis اجرا شدند. ابتدا با خبرگان اولیه شامل ۱۰ متخصص باسابقه در حوزه دیجیتالی شدن، تحول صنعتی و پایداری در بین اساتید و دانشجویان دانشگاه تهران و دانشگاه مازندران از طریق ایمیل یا تلفن تماس گرفته شده است. سپس بر اساس عواملی مانند تطابق بین دانش متخصص و دامنه تحقیق حاضر و پیشینه علمی تعداد کارشناسان بالقوه به ۵ نفرمتخصص کاهش یافت. سپس هر متخصص پرسشنامه را تکمیل کرد که شامل پر کردن پرسش‌نامه دلفی فازی و روش ISM بود. مشخصات متخصصین در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول شماره (۳): مشخصات خبرگان پژوهش

کد خبره	میزان تجربه	سن	جنسیت	تحصیلات
۱	۱۰ سال	۳۴	مرد	دکتری تخصصی
۲	۵ سال	۳۶	مرد	دانشجوی دکتری

[28] Multi-criteria decision making
[29] Interpretive Structural Modelling
[30] Triple Bottom Line (TBL)

۳	۲۰سال	۶۶	مرد	دکتری تخصصی
۴	۵ سال	۲۸	مرد	کارشناس ارشد
۵	۵ سال	۳۷	زن	دانشجوی دکتری

شکل شماره (۱): مراحل انجام پژوهش

الف) روش دلفی فازی[۳۱]: هر متخصص نظر خود را در مورد اهمیت هر عامل با توجه به اصطلاحات زبانی و سپس با توجه به قوانین جدول ۵ و تبدیل به اعداد فازی مثلثی(TFN[۳۲])به اشتراک گذاشت(Amoozad Mahdiraji et al., 2022). سپس مقدار فازی تجمیع شده برای هر عملگر از طریق فرمول Dk اندازه گیری می‌شود. جایی که $D_j^k=(a_j^k,m_j^k,b_j^k)$ میزان اهمیت عملگر j از k امین خبره ، $k=\{1,2,\ldots,L\}$ و AFV_j مقدارارزش فازی تجمیع شده عامل j است (Dwivedi et al., 2023).

$$AFV_J=(a_j,m_j,b_j)=(\min D_j^k,\Pi D_j^k,\max D_j^k) \quad (۱)$$

سپس مقدار ارزش دی‌فازی شده هر معیار با فرمول زیر به دست می‌آید.

$$DF_j=a_j+[(b_j-a_j)+(m_j-a_j)/3] \quad (۲)$$

در صورتی که تفاوت مقادیر غیرفازی برای هر عامل کمتر از مقدار آستانه (۰.۲) باشد، و همچنین DFj برای عامل بالاتر از مقدار آستانه (۰.۷) باشد، آن عامل انتخاب می‌شود. در غیر این صورت، از لیست اولیه حذف می‌شود. بر این اساس، اگر میانگین امتیاز یک عامل در دو دور FDI کمتر از ۰.۲ باشد ،آن عامل شرط اول را نداشته است. علاوه بر این، عواملی که شرط اول را گذرانده اند، آنهایی که میانگین امتیاز غیرفازی برابر یا بالاتر از ۰.۷ دارند، برای بررسی بیشتر انتخاب می‌شوند. این رویکرد تا زمانی که تمام محرک‌ها انتخاب یا از لیست اولیه حذف شوند، تکرار می‌شود(Amoozad Mahdiraji et al., 2023).

جدول شماره (۵): اصطلاحات زبانی و TFN برای دلفی فازی

B	M	a	اصطلاحات زبانی
۱	۱	۰/۹	خیلی مهم
۰/۹	۰/۹	۰/۷	تقریبا مهم
۰/۷	۰/۷	۰/۵	متوسط
۰/۵	۰/۵	۰/۳	تقریبا غیرمهم
۰/۱	۰/۱	۰	غیرمهم
۰	۰	۰	کاملا غیرمهم

[31] Fuzzy Delphi method
[32] Triangular fuzzy numbers

ISM توضیح روابط پیچیده بین متغیرهای یک سیستم واقعی را تسهیل کرده و آنها را به یک مدل بصری معنادار تبدیل می‌کند. بررسی ادبیات همچنین نشان می‌دهد که ISM یک روش محبوب برای مدل‌سازی رابطه علی بین اجزای یک پدیده خاص و ایجاد نظریه بوده است و امکان تحلیل نموداری از سیستم‌های پیچیده اجتماعی–اقتصادی را فراهم می‌کند. به عنوان مثال، ISM برای مدل‌سازی پایداری انرژی(Ghobakhloo & Fathi, 2021)، تولید ناب، پایداری لجستیک، پیاده‌سازی فناوری تولید هوشمند و تولید پایدار مناسب است. مراحل این روش شامل:۱. ایجاد روابط و تشکیل ماتریس خود تعامل ساختاری **:** برای ایجاد و شناسایی جهت رابطه بین هر جفت متغیر، تکنیک ISM از نمادهای زیر استفاده می‌کند(Olsen, 1982).V: تابع i برتابع j اثر دارد. A : تابع jبر تابع i اثر دارد. X : توابع i و j یکدیگر را تعیین می‌کنند و بر هم اثر دارند. O : توابع i و j به هم مرتبط نیستند و رابطه‌ای با هم ندارند. ۲. ایجاد ماتریس دسترسی اولیه: IRM یک ماتریس باینری است که با جایگزین کردن نمادهای V، A، X، O در SSIM با مقادیر ۱ یا ۰ تحت قوانین جایگزین زیر ایجاد می شود(Kaswan & Rathi, 2019). اگر ورودی (i,j)درماتریس خود تعامل ساختاری V باشد، ورودی (i,j)در ماتریس دسترس‌پذیری روی ۱ تنظیم می‌شود، در حالی که ورودی (j,i)روی ۰ تنظیم می‌شود. اگر ورودی (i,j) در ماتریس خود تعامل ساختاری A باشد، ورودی (i,j)در ماتریس دسترسی روی ۰ تنظیم می شود در حالی که ورودی (j,i)روی ۱ تنظیم می شود. اگر ورودی (i,j)در ماتریس خود تعامل ساختاری X باشد، هر دو ورودی(i,j) و (j,i)در ماتریس دسترسی روی ۱ تنظیم می شوند. اگر ورودی (i,j)در ماتریس خود تعامل ساختاری 0 باشد، در ماتریس دسترسی پذیری هر دو ورودی (i,j)و (j,i) روی ۰ تنظیم می شوند.۳. ایجاد ماتریس دسترسی نهایی: در این مرحله برای اطمینان باید روابط ثانویه کنترل شود. به این معنا که اگر A منجر به B شود و B منجر به C شود در این صورت باید A منجر به C شود. یعنی اگر براساس روابط ثانویه اثرات مستقیم لحاظ شده باشد اما در عمل این اتفاق نیفتاده باشد باید جدول تصحیح شود و رابطه ثانویه را نیز نشان داد. ۴. تعیین روابط و سطح بندی ابعاد و شاخص‌ها: برای یک تابع معین، مجموعه دسترس پذیری شامل تابع و سایر توابع ناشی از آن است، در حالی که مجموعه مقدم شامل تابع و سایر توابع است که باعث آن می‌شود. تقاطع یک تابع معین شامل توابعی است که معمولاً در دسترس پذیری و مجموعه های پیشین مشترک هستند. برای شناسایی سطح سلسله مراتبی توابع، رویه‌های استخراج به صورت تکراری انجام می‌شوند به طوری که در هر تکرار، توابع با قابلیت دسترسی یکسان و مجموعه‌های تقاطع شناسایی و استخراج می‌شوند.

۳- نتایج و بحث

با تکیه بر ادبیات تحقیق ۲۴ عملگر کلیدی صنعت نسل۴ در حوزه پایداری شناسایی شده است. این مولفه‌های استخراج شده در قالب پرسش نامه‌ای با طیف‌های زبانی شامل خیلی مهم، تقریبا مهم، متوسط، تقریبا غیرمهم، غیرمهم و کاملا غیرمهم برای خبرگان ارسال گردید. و سپس به اعداد فازی مثلثی تبدیل و بر اساس فرمول ۱ و ۲ در دو مرحله پیاده‌سازی شدند. البته باید گفت که خبرگان هیچ مولفه جدیدی به پرسش نامه اضافه نکردندکه دلیلی بر جامع بودن شیوه‌های شناسایی شده در ادبیات پژوهش است. زنجیره تامین۴ نتایجی را از منظر زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی برای جامعه و سازمان در جهت حصول به پایداری داراست. شامل: خود سازماندهی و سازگاری[۳۳]: این ویژگی سیستم را قادر می‌سازد تا داده‌ها را از دستگاه‌های ناهمگن در قالب مورد نیاز بازیابی کند و بر عملکرد سیستم نظارت کند(Rajput & Singh, 2019). نوآوری مدل کسب وکار[۳۴]: اصول طراحی Industry 4.0، مانند قابلیت همکاری و تمرکززدایی، شیوه طراحی و ارائه محصولات و خدمات را به شدت تغییر داده است. همچنین منجر به معرفی و کاربرد گسترده مدل‌های کسب‌وکار جدید مانند نوآوری با منبع جمعی [۳۵](CSI)، تولید به عنوان سرویس[۳۶] (MaaS) و PaaS[۳۷]، شده است که ممکن است فرصت‌های پایداری اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی را ارائه

[33] Self-organisation and adaptation
[34] Business model novelty and innovation
[35] Crowd-Sourced Innovation
[36] Manufacturing as a Service
[37] Product-as-a service

دهد(Ng & Ghobakhloo, 2020). کاهش انتشار کربن و گازهای‌گلخانه‌ای/گازهای مضر[۳۸]: کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای یکی از معیارهای ارزیابی اثربخشی عملیات پایدار است(Kumar et al., 2021). صنایع، دلیل بیش از ۴۰ درصد انتشارگازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان هستند. کارشناسان معتقدند دیجیتالی‌سازی تولید و ظهور چهارمین انقلاب صنعتی فرصت‌های متعددی را برای کاهش انتشار کربن، افزایش کارایی، انعطاف‌پذیری تولید وکاهش ضایعات در هر محصول ارائه می‌دهد. فرصت های ارائه شده توسط Industry 4.0 برای توسعه مدل‌های تجاری جدید، مانند تغییر از تولید انبوه به سفارشی‌سازی انبوه و حتی شخصی‌سازی محصول، می‌تواند به تحقق آینده‌ای بدون دی‌اکسیدکربن با پایداری بیشتر محیط‌زیست و پایداری اجتماعی کمک کند(Ng & Ghobakhloo, 2020). بهبود سودآوری شرکت[۳۹]: گزارش‌های صنعتی نشان می‌دهد که کاربرد فناوری Industry 4.0 مانند IIoT، ساخت افزودنی[۴۰]، سرویس ابری[۴۱]، تجزیه و تحلیل داده‌ها و توسعه اصول طراحی صنعت ۴.۰ مانند تولید هوشمند[۴۲] با فرصت‌های پایداری اقتصادی متعددی مانند بهینه‌سازی جریان مواد، زمان کمتر برای بازاریابی محصولات، بهینه‌سازی فضای تولید و تأسیسات، بهره‌وری منابع،کاهش ضایعات، نوآوری وکیفیت برتر محصول، بهبود ظرفیت تولید ، سازگاری استراتژیک وکاهش هزینه‌های انبارداری و موجودی(Ghobakhloo, 2020)، قابلیت اطمینان بیشتر تجهیزات، کاهش زمان از کار افتادن دستگاه، موجودی بهینه و بهبود تعامل کارکنان(Ching et al., 2022) منجر به افزایش سودآوری تولید و محافظت از محیط زیست می‌شود. توسعه اقتصادی[۴۳]: کارشناسان معتقدند وقتی اصول Industry 4.0 در سراسر اکوسیستم تجاری پیاده شود، دیجیتالی‌شدن می‌تواند به توسعه اقتصادی کشورها به ویژه کشورهای کمتر توسعه یافته، و به طور مثبت به توسعه اقتصاد دایره‌ای[۴۴] کمک بزرگی کند. اگرچه Industry 4.0 بسیاری از مشاغل را از بین می برد، با این حال، فرصت های شغلی بی‌شماری مرتبط با دیجیتالی شدن ایجاد می‌کند. انتظار می‌رود که Industry 4.0 به جای نابودی شغل‌ها، به‌عنوان یک کارآفرین عمل کند. از آنجایی که صنعت ۴.۰ از زنجیره تامین یا مرزهای تولید فراتر می‌رود و کانال‌های توزیع و بازارهای مصرف جهانی را در بر می‌گیرد، گسترش فناوری‌های صنعت ۴.۰ فرصت‌های ارزشمندی برای ابعاد مختلف توسعه اقتصادی پایدار خواهد داشت(Ghobakhloo, 2020). بهبود لجستیک سبز[۴۵]و بهبود خرید سبز[۴۶]: تمام شیوه های سبز مانند استفاده از مواد بسته بندی سبز، انتشار کم کربن وسیله نقلیه و نگهداری مناسب از خودرو بخشی از لجستیک سبز هستند. همچنین شامل خرید مواد سبز و اجزای فرعی سبز، برای تولید کالا و خدمات می‌شود(P. Kumar et al., 2021). پایداری انرژی و منابع[۴۷]: بهره‌وری منابع و انرژی قلب صنعت ۴.۰ است. فناوری های دیجیتالی،کنترل مصرف انرژی و منابع را در سطح زنجیره تامین فراهم می‌کنند. در سطح کارخانه هوشمند، ماشین‌آلات مجهز به حسگر، سیستم‌های تولید هوشمند و سیستم‌های مدیریت انرژی، پایداری طولانی‌مدت را با امکان تشخیص مستمر مصرف منابع و انرژی ارتقا می‌دهند(Ching et al., 2022). همچنین تحول دیجیتال که توسط صنعت ۴.۰ آغاز شده است، از پایداری زیست‌محیطی از طریق تبدیل انرژی و منابع پایدار به کمک سیستم‌های انرژی دیجیتالی پشتیبانی می‌کند. شبکه‌های هوشمند که ادغام شبکه‌های برق و منابع انرژی تجدیدپذیر را تسهیل می‌کنند و شبکه‌های بی‌سیم نمونه‌ای از مفاهیم دیجیتالی‌سازی است که به طور گسترده در ادبیات به رسمیت شناخته شده است. ظهور فناوری‌های تولید دیجیتال پیشرفته (CPPS)، ساخت افزودنی و رباتیک هوشمند)، به میزان قابل توجهی به کارایی و صرفه‌جویی در مصرف مواد کمک کرده‌اند و راه را برای پایداری اقتصادی هموارکرده‌اند. ساخت افزودنی به عنوان یکی از پرکاربردترین فناوری‌های صنعت نسل ۴ با بازیافت موادی مانند پلاستیک، فلز و زباله‌های آلی به شرکت‌ها جهت کاهش مصرف مواد و انرژی و کاهش تولید زباله کمک می‌کنند. علاوه بر این، با اجرای

[38] Carbon/harmful gas emission reduction
[39] Corporate profitability improvement
[40] additive manufacturing
[41] cloud service
[42] smart manufacturing
[43] Economic development
[44] circular economy
[45] Improving green logistics
[46] Improving green purchasing
[47] Energy and resource sustainability

فناوری‌های دیجیتال ، اصول اقتصاد دایره‌ای و طراحی دایره‌ای استفاده مجدد منابع در پایان عمر محصولات را تسهیل می‌کنند(Viles et al., 2022) . توسعه مسئولیت زیست محیطی[۴۸]: صنعت نسل۴ موجب افزایش مسئولیت‌های اجتماعی و زیست‌محیطی می‌گردد(Bai et al., 2020). فناوری‌هایی مانند تولید افزودنی، توسعه محصولات جدید سازگار با محیط زیست را تسهیل می‌کنند. شیوه‌های مدیریت زیست‌محیطی مانند ارزیابی چرخه عمر، تعادل زیست‌محیطی، معیارهای عملکرد زیست‌محیطی به شدت نیازمند اطلاعات هستند و قابلیت‌های یکپارچه‌سازی، اشتراک‌گذاری و مدیریت داده‌ها و اطلاعات، IoT[۴۹]، و کلان داده‌های ابری، توسعه ارزش‌ها و قابلیت‌های مدیریت زیست‌محیطی در سراسر شبکه را تسهیل می‌کند. از منظر پایداری اقتصادی، دیجیتالی شدن به کسب‌وکارها اجازه می‌دهد تا هوش بازار را بدست آورند و فرصت‌های پایداری زیست‌محیطی را بیشتر درک کنند. همچنین تأثیرIndustry 4.0 بر مدیریت دانش در زنجیره تأمین، انعطاف‌پذیری تولید و مدولار بودن طراحی، فرصت‌های پایداری محیطی مختلفی را از نظر کاهش ضایعات و کارایی مواد ارائه می‌دهد(Ghobakhloo, 2020). توسعه منابع انسانی[۵۰]: صنعت ۴.۰ و تحول دیجیتال اساساً روشهای کار برای منابع انسانی را تغییر می‌دهند. کارشناسان بر این باورند که ساده سازی و اتوماسیون فرآیندها و تصمیم گیری می‌تواند کارایی منابع انسانی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. برای مثال، هوش مصنوعی و ابزارهای تجزیه و تحلیل داده‌ها، می‌توانند مدیران را قادر به استخراج الگوهای معنادار از داده‌های کارکنان و ارائه طرح‌های توسعه شغلی شخصی و برنامه‌های یادگیری بر اساس رفتار، تجربه، مهارت‌ها، شخصیت و الگوهای یادگیری هر کارمند کنند. استفاده از IoP که معمولاً به عنوان شبکه‌های اجتماعی از آن یاد می شود، به کارکنان و مدیران اجازه می دهد تا آزادانه‌تر و تعاملی‌تر با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و شکاف ارتباطی بین رهبری، مدیران میانی و کارکنان را کاهش دهد. سازمان‌ها همچنین می‌توانند هوش مصنوعی را برای بررسی دقیق یک موقعیت شغلی خاص و شناسایی مناسب‌ترین نامزدها که شایستگی‌های لازم را در بین استعدادهای موجود دارند، پیاده‌سازی کنند(Ghobakhloo, 2020). بهبود مدیریت، برنامه‌ریزی و کنترل تولید[۵۱]: امروزه صنعت نسل ۴ تولیدکنندگان را قادر می‌سازد تا جریان‌های مواد را تجسم اتوماسیون را شبیه‌سازی، گلوگاه‌های بالقوه را شناسایی و حتی کل فرآیند تولید را به‌طور مجازی برنامه‌ریزی و در عین حال بهینه‌سازی مصرف انرژی را در اولویت قرار دهند. راه اندازی مجازی خط تولید نیز به عیب‌یابی و بهینه‌سازی خطوط یا سلول‌های تولید و دستیابی به پایداری انرژی کمک می‌کند(Ghobakhloo & Fathi, 2021). تصمیم‌گیری آگاهانه[۵۲] : قابلیت‌های پردازش اطلاعات فناوری‌هایی مانند داده‌های ابری، هوش مصنوعی و تجزیه و تحلیل داده‌ها، پردازش حجم عظیمی از داده‌های تولید شده در طول چرخه عمر محصولات و خدمات را در سراسر شبکه ارزش ممکن می‌سازد. IIoT، داده کاوی، و خدمات ابری می‌توانند داده ها را به سرعت جمع آوری کنند. از زنجیره‌های تامین، اطلاعات شفاف استخراج کرده، گزینه‌های تحلیلی متعددی را ارائه می‌کنند و آنها را به شاخص‌های عملکردی معناداری در بین شرکای تجاری تبدیل می‌کنند(Ghobakhloo & Fathi, 2021). افزایش راندمان و بهره‌وری تولید[۵۳]: دیجیتالی‌سازی تولید به تولیدکنندگان اجازه می‌دهد تا سیستم تولید چابک ناب را توسعه و پیاده‌سازی کنند. سیستم تولید ناب چابک به نوبه خود اجازه می‌دهد تا خواسته‌های دائماً در حال تغییر مشتری را حتی از طریق تعداد کم یا تولید یک‌دسته به‌طور سودآور برآورده کنند. تسهیل تعمیر و نگهداری بلادرنگ، نظارت بر عملکرد ماشین در زمان واقعی، افزایش راندمان و کاهش زمان از کار افتادن ماشین و مهمتر از همه اتوماسیون صنعتی، مداخلات انسانی را کاهش می دهد که منجر به کاهش خطاهای انسانی، کاهش خطر و نگرانی های ایمنی می‌شود. خدمات دیجیتال متصل در فضای ابری به شرکت ها امکان می‌دهد محصولات هوشمندی را با حسگرها، پردازنده‌ها، نرم‌افزارهای تعبیه‌شده و متصل از طریق اینترنت راه‌اندازی کنند که عملکردها و قابلیت‌های جدیدی را در

[48] Environmental responsibility development
[49] Internet of thing
[50] Human resource development
[51] Improved production management, planning and control
[52] Informed decision making
[53] Increased production efficiency and productivity

رابطه با نظارت، کنترل، بهینه‌سازی و استقلال آنها ممکن می‌سازد. با اینترنت اشیا محصولات می‌توانند با سایر محصولات و سیستم ها ارتباط برقرار کنند، نتایج کلی را بهینه کرده و خدمات پس از فروش را فعال کنند(Dalenogare et al., 2018). البته گاهی ممکن است افزایش بهره وری برحسب افزایش سودآوری ثبت شود و گاهی کاهش در مصرف منابع و تولید زباله ایجاد کند(Tseng et al., 2018). ایجاد شغل[۵۴]: از منظر چالش‌ها، محدودیت‌های فناوری‌های Industry 4.0 مانندکاهش شغل‌های سنتی، مسائل مربوط به امنیت اطلاعات و پیچیدگی داده‌ها می‌باشد(Bai et al., 2020). روبات‌های صنعتی، وسایل نقلیه خودکار و ماشین‌های هوشمند جایگزین انسان‌ها در فعالیت‌های متعددی مانند کنترل موجودی، کنترل کیفیت، و حتی توزیع محصول می‌شوند. اما از دست دادن شغل افراد به دلیل اتوماسیون با ایجاد فرصت‌های شغلی جدید متعدد که قبلا وجود نداشته‌اند در زمینه انفورماتیک، مکاترونیک، مهندسی فرآیند، و یکپارچه‌سازی سیستم مانند مهندسان نرم‌افزار، کارشناسان فناوری اطلاعات، و اپراتورهای چند مهارته ماشین‌آلات همراه است. پیامدهای پایداری اجتماعی صنعت ۴.۰ صرفاً به ایجاد فرصت‌های شغلی مرتبط با دیجیتالی شدن محدود نمی شود. صنعت ۴.۰ و دیجیتالی شدن به اقتصاد سبزتر و پایدارتر کمک می‌کند که منجر به ایجاد میلیون‌ها فرصت شغلی مرتبط با تولید پایدار می‌شود(Ghobakhloo, 2020). فرصت‌های شغلی جدید اگر به درستی اداره شوند، می توانند نابرابری شغلی و درآمدی را کاهش دهند(Ching et al., 2022). همچنین منجر به ایجاد فرصت های شغلی برای کارمندان معلول و مسن می‌گردد(Machado et al., 2020). کاهش هزینه تولید[۵۵]: تولید بدون وقفه ۷/۲۴ ، بهبود کنترل پذیری فرآیند، بهبود دقت و کیفیت ساخت، نظارت در زمان واقعی و پیشگیری از خرابی، افزایش راندمان تعمیر و نگهداری، اثربخشی بالاتر تجهیزات، خطاهای انسانی کمتر، تصمیم گیری با کیفیت، فرآیندهای تدارکات ساده، کاهش هزینه‌های منابع انسانی و بهره‌وری مواد/منابع/انرژی نمونه هایی از پیامدهای صنعت ۴.۰ برای کاهش هزینه‌های تولید هستند(Ching et al., 2022; Ghobakhloo, 2020). استفاده بهینه از ماشین‌آلات یک شرکت با پشتیبانی فناوری‌های مبتنی بر صنعت ۴.۰، امکان تعمیر و نگهداری پیش‌بینی‌گیرانه را فراهم می‌کند. از طریق نظارت دائمی و از راه دور شرایط ماشین آلات، کاهش زمان از کار افتادن یا زمان تعویض ماشین و تشخیص زودهنگام خرابی‌ها، مشکلات احتمالی کمتر می شود. بنابراین پیشگیری و اصلاح زودهنگام عیوب می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها و ایجاد ارزش شود. و زمان از کار افتادگی دستگاه ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش و عمر دستگاه ۲۰ تا ۴۰ درصد افزایش یابد(Blunck & Werthmann, 2017). چابکی و انعطاف پذیری تولید[۵۶]: امروزه تولیدکنندگان با عدم قطعیت تقاضا و کاهش طول عمر محصولات و فناوری‌های تولید مواجه هستند.در چنین شرایطی، Industry 4.0 تولیدکنندگان را قادر می‌سازد تا یک سیستم تولیدی چابک‌تر و انعطاف‌پذیرتر را توسعه دهند. برنامه‌ریزی منابع(ERP[۵۷]) ، شبیه‌سازی صنعتی و تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ به کسب‌وکار اجازه می‌دهد تا با عدم قطعیت‌های محیطی به طور موثر برخورد کند و فرآیندهای تغییر را مدیریت کند(Ching et al., 2022). مدولار بودن تولید[۵۸]:. طراحی محصول ماژولار از دیگر فرصت‌های پایداری است که توسط مدولارسازی تولید ارائه می‌شود و به نوبه خود، مزایایی مانند زمان کوتاه‌تر برای بازاریابی، کاهش پیچیدگی تولید و هزینه‌ها، کیفیت و طول عمر بیشتر محصول، بهره وری مواد و منابع، ماژولارسازی فیزیکی تجهیزات تولید، فرآیندهای جایگزین بدون مهندسی مجدد و هزینه‌های مجدد اتوماسیون، بهره‌وری بالاتر، فرآیند پایدارتر، قابلیت سفارشی‌سازی محصول وکاهش ضایعات را داراست. از سوی دیگر، CAD/CAM[۵۹] می‌تواند به جنبه‌های عملیاتی یکپارچه‌سازی عمودی کمک کند(Dalenogare et al., 2018). دیجیتالی شدن زنجیره ارزش[۶۰]: دیجیتالی‌شدن زنجیره ارزش افقی، جریان اطلاعات و جریان کالا را یکپارچه و بهینه می‌کند. در این رویکرد همه حوزه‌های داخلی شرکت (مانند خرید، تولید، تدارکات) به هم متصل می‌شوند و همه شرکای خارجی ارزش‌آفرین هستند. ادغام افقی در Industry 4.0 کارخانه هوشمند را قادر می‌سازد تا دائماً با شرایط جدید مانند حجم سفارش یا در دسترس بودن مواد

[54] Job creation
[55] Manufacturing cost reduction
[56] Manufacturing agility and flexibility
[57] Enterprise Resource Planning
[58] Production modularity
[59] Computer-Aided Design - Computer-Aided Manufacturing
[60] Value chain digitization

سازگار شود(Blunck & Werthmann, 2017). ظهور شبکه‌های دیجیتال منجر به یکپارچه‌سازی با تأمین‌کنندگان و مشتریان می‌شود و فرصت‌های ارزشمندی را جهت ذخیره انرژی فراهم می‌کند(Ghobakhloo & Fathi, 2021). کاهش زمان ورود به بازار[۶۱]: اولین عرضه‌کننده در بازار یک محصول جدید می‌تواند درآمد بیشتر و رقبای کمتری داشته باشد. فناوری‌های جدیدی که با Industry 4.0 ظهور می‌کنند، فرآیندهای تحقیق و توسعه سریع‌تر و ارزان‌تر را ممکن می‌سازند. به عنوان مثال مهندسی همزمان یا نمونه‌سازی سریع با استفاده از پرینت سه بعدی می‌تواند زمان عرضه به بازار را به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد(Blunck & Werthmann, 2017). سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی[۶۲]: فناوری‌های دیجیتالی زیربنایی Industry 4.0، اپراتورها و مصرف‌کنندگان انرژی را قادر می‌سازد تا نیازهای انرژی و هزینه‌های خود را در زمان واقعی کنترل کنند و از حرکت به سمت انرژی مطمئن‌تر، مقرون‌به‌صرفه‌تر و پاک‌تر حمایت کنند (Ghobakhloo & Fathi, 2021). شخصی‌سازی محصول[۶۳]: به کمک استراتژی شخصی‌سازی تولید و داده‌کاوی، تولیدکنندگان قادر می‌شوند مستقیماً با مشتری ارتباط برقرار کرده و با آنها تعامل داشته باشند و حجم عظیمی از داده‌ها را در مورد ترجیحات مشتری و عادت‌های مصرف جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل کنند. با تولید افزودنی می‌توان محصولات را قبل از تولید فیزیکی به صورت دیجیتالی اصلاح کرد و زمان پردازش، منابع و ابزارهای مورد نیاز را کاهش داد. این فناوری باعث افزایش نوآوری و تبلیغ محصولات سفارشی‌تر می‌شود(Dalenogare et al., 2018). تولید افزودنی با ویژگی مدولار بودن تولید کارخانه‌های هوشمند به تولیدکنندگان اجازه می‌دهد تا محصولات فوق‌شخصی‌شده را بر اساس ترجیحات مصرف‌کننده و ایده‌های جدید تولید کنند. به لطف ظهور سیستم‌های تولید انبوه دارای قابلیت تنظیم چندباره در روز، مشتریان می‌توانند محصولات را با قیمت بسیار مقرون‌به‌صرفه‌تری دریافت کنند و ارزش بیشتری از هر واحد از محصول کسب شود(Ghobakhloo, 2020). مدیریت ریسک و ایمنی[۶۴]: مراقبت مناسب از کارکنان و مراقبت‌های بهداشتی جامعه بخشی از مسئولیت اجتماعی شرکت ها است (P. Kumar et al., 2021). به لطف پیشرفت‌های هوش مصنوعی، تجزیه و تحلیل داده‌ها و یادگیری ماشینی، اتوماسیون و ربات‌های مشارکتی که قابلیت شناسایی خطر و ارزیابی ریسک را دارند، کارگران از کارهای غیر ارگونومیک و خطرناک خلاص می‌شوند(Ching et al., 2022). ابزارهایی مانند دوربین‌های هوشمند، حسگرهای هوشمند، پوشیدنی‌های ایمنی هوشمند و سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند هر گونه رفتار انسان یا ماشین را که ممکن است خطری ایجاد کند، شناسایی و گزارش کنند. فناوری‌های سازگار با صنعت ۴.۰ در حوزه مدیریت تعمیر و نگهداری که امکان عیب‌یابی و حل مشکلات را در زمان واقعی دارد، نگرانی ایمنی محیط‌های تولید را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد(Ghobakhloo, 2020). توسعه محصول پایدار[۶۵] : توسعه محصول پایدار به شدت نیازمند منابع،اطلاعات و فناوری است. فناوری دیجیتال و شبیه‌سازی کل چرخه عمر یک محصول از مرحله ایده‌پردازی تا تحویل به مشتری را متحول می‌کند. طراحی محاسباتی نیز به کمک رایانه و فن‌آوری‌های تولید مواد افزودنی با کارایی بالا ، اثربخشی را افزایش می‌دهد(Ching et al., 2022). یکپارچه سازی زنجیره تامین[۶۶]: یکپارچه‌سازی فرآیند زنجیره تامین و ویژگی‌های آن مانند مدیریت دانش، توسعه محصول، برنامه‌ریزی محصول، برنامه‌ریزی تقاضا و ابتکارات تصمیم‌گیری، فرصت‌های توسعه اقتصادی و زیست‌محیطی عظیمی را ارائه می‌دهد(Ching et al., 2022). ویژگی‌هایی مانند پویابودن، یکپارچگی، هوشمندبودن، مقیاس‌پذیربودن و چابکی DSNها مزایای متعددی مانند بالانس بودن خط تولید در زنجیره تامین، کارایی عملیاتی بالاتر، یکپارچه‌سازی جریان مالی، برنامه‌ریزی پویا، اثربخشی بازاریابی، برنامه‌ریزی مشارکتی وطراحی محصول مشترک را داراست. فناوری‌های I4.0 امکان یکپارچه‌سازی، اتوماسیون و دیجیتالی‌کردن فرآیندها را فراهم می‌کنند و در نتیجه منجر به بهبود در خرید، تولید، تدارکات و سایر عملکردها می‌شوند (Bag & Pretorius,

[61] Reducing time to market
[62] Smart energy management systems
[63] Product personalization
[64] Risk and safety management
[65] Sustainable product development
[66] Supply chain integration

(2022. افزایش رفاه اجتماعی[۶۷]: انتظار می‌رود صنعت ۴ مدل‌های جدید بازاریابی و توزیع، دسترسی جهانی و مقرون به صرفه بودن تولید کالاها و ارائه خدمات مناسب‌تر را افزایش دهند(Ghobakhloo, 2020). از بعد پایداری اجتماعی، سیستم‌های تولید هوشمند می‌توانند سلامت و ایمنی کارکنان را با بر عهده گرفتن وظایف یکنواخت و تکراری افزایش دهند و منجر به رضایت و انگیزه بیشتر کارکنان شوند(Bai et al., 2020). پس از شناسایی متغیرهای پژوهش در مرحله بعد پس از نظرخواهی از خبرگان پژوهش دارای تحصیلات دانشگاهی و سوابق علمی و اجرایی مرتبط و بر اساس روش دلفی فازی در یک مرحله بنا بر توافق بین خبرگان، نتایج طیق جدول ۶ به کمک نرم‌افزار EXCELL به دست آمده است. از این میان تعداد۸ عملگر دارای میانگین بالاتر از ۰.۷ برای بررسی بیشتر توسط کارشناسان انتخاب شدند. عملگرهای منخب شامل: خود سازماندهی و سازگاری، نوآوری مدل کسب و کار، بهبود سودآوری شرکت، تصمیم‌گیری آگاهانه، افزایش راندمان و بهره وری تولید، چابکی و انعطاف‌پذیری تولید، دیجیتالی شدن زنجیره ارزش و سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی می‌باشند. برای هر متغیر نمادی با عنوان Ci در نظر گرفته می‌شود.

جدول شماره (۶): نتایج دلفی فازی

نام عملگر	AFV_j		DFj
خود سازماندهی و سازگاری	۱	۰/۷۲۹	۰/۷	۰/۸۰۹
نوآوری مدل کسب و کار	۱	۰/۷۲۹	۰/۷	۰/۸۰۹
کاهش انتشار کربن/گازهای مضر	۱	۰/۱۲۵	۰/۳	۰/۴۷۵
بهبود سودآوری شرکت	۱	۰/۷۲۹	۰/۷	۰/۸۰۹
توسعه اقتصادی	۰/۹	۰/۳۶۴۵	۰/۳	۰/۵۲۱۵
بهبود لجستیک سبزو بهبود خرید سبز	۱	۰/۲۲۵	۰/۳	۰/۵۰۹
پایداری انرژی و منابع	۱	۰/۴۵	۰/۳	۰/۵۸
توسعه مسئولیت زیست محیطی	۰/۷	۰/۱۷۱۵	۰/۳	۰/۳۹۰۵
توسعه منابع انسانی	۱	۰/۵	۰/۳	۰/۶
بهبود مدیریت، برنامه‌ریزی و کنترل تولید	۱	۰/۴۰۵	۰/۳	۰/۵۶۸
تصمیم گیری آگاهانه	۱	۰/۷۲۹	۰/۷	۰/۸۰۹
افزایش راندمان و بهره وری تولید	۱	۰/۷۲۹	۰/۷	۰/۸۰۹
ایجاد شغل	۰/۹	۰/۱۱۲۵	۰/۳	۰/۴۳۷۵
کاهش هزینه تولید	۰/۹	۰/۵۱۰۳	۰/۵	۰/۶۳۷
چابکی و انعطاف پذیری تولید	۱	۰/۸۱	۰/۷	۰/۸۳
مدولار بودن تولید	۰/۹	۰/۳۶۴۵	۰/۳	۰/۵۲۱۵
دیجیتالی شدن زنجیره ارزش	۱	۰/۸۱	۰/۷	۰/۸۳
کاهش زمان ورود به بازار	۰/۹	۰/۳۶۴۵	۰/۳	۰/۵۲۱۵
سیستم های هوشمند مدیریت انرژی	۰/۹	۰/۶۵۶۱	۰/۷	۰/۷۵۲
شخصی سازی محصول	۰/۹	۰/۲۰۲۵	۰/۳	۰/۴۶۷۵
مدیریت ریسک و ایمنی	۱	۰/۱۲۵	۰/۳	۰/۴۷۵
توسعه محصول پایدار	۱	۰/۲۲۵	۰/۳	۰/۵۰۸
یکپارچه سازی زنجیره تامین	۰/۹	۰/۳۶۴۵	۰/۳	۰/۵۲۱۵
افزایش رفاه اجتماعی	۱	۰/۱۵	۰/۱	۰/۴۱۶

مطالعه حاضر از روش ISM پیروی کرده است. پس از تماس مجدد با گروه تخصصی انتخاب شده و تعریف اهداف و روش معرفی شده، پرسش‌نامه دوم برای خبرگان ارسال گردید تا مقایسات زوجی انجام گیرد. در این راستا کارشناسان پرسشنامه مربوطه را تکمیل کردند و میانگین مقدار برای ماتریس اندازه‌گیری شد. ایجاد روابط متنی بین کارکردهای پایداری از طریق

[67] Social welfare enhancement

گرفتن نظرات ۵(تعداد) متخصص در طول جلسات مختلف منجر به توسعه ماتریس خود تعامل ساختاری ((SSIM[۶۸])می‌شود که در جدول ۷ ارائه شده است. به عنوان مثال عامل C1و عامل C4علت یکدیگر هستند. بنابراین در جدول نماد X ثبت می‌گردد. جدول ۸ ماتریس دسترسی اولیه (IRM[۶۹])این مطالعه را ارائه می‌دهد. IRM یک ماتریس باینری است که با جایگزین کردن نمادهای V، A، X، O در SSIM با مقادیر ۱ یا ۰ تحت قوانین خاص ایجاد می شود.

جدول شماره (۷): جدول SSIM برای توابع پایداری صنعت ۴.۰.

عوامل	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1		A	O	X	V	V	A	O
C2			X	A	V	X	X	X
C3				A	A	A	A	A
C4					V	V	V	X
C5						V	A	A
C6							A	A
C7								X
C8								

جدول شماره(۸): جدول IRM برای توابع پایداری صنعت ۴.۰.

عوامل	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
C2	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱
C3	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰
C4	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
C5	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰
C6	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰
C7	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱
C8	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

ماتریس دسترسی نهایی (FRM)با قرار دادن روابط متقابل درون IRM به ویژگی گذرا توسعه می‌یابد. جدول ۹ FRM این مطالعه را نشان می‌دهد. گذرا بودن روابط، یک فرض اساسی در تکنیک ISM است. به عنوان مثال اگر تابع A تابع B را تعیین می‌کند و تابع B تابع C را تعیین می‌کند، پس تابع A الزاماً تابع C را تعیین می‌کند. براساس اثرات روابط ثانویه، اثرات غیرمستقیم باید لحاظ شده و جدول تصحیح شود. روابط ثانویه با * نمایش داده شده است. پس از تشکیل ماتریس دستیابی، به کمک « مجموعه پیشنیاز » و « مجموعه دستیابی »به تعیین روابط و سطح بندی شاخص‌ها می‌پردازیم. همچنین جدول ۹ نشان دهنده قدرت محرک و قدرت وابستگی هر تابع است. برای یک تابع معین، توان محرکه برابر است با تعداد عملکردهایی که به طور مستقیم یا غیرمستقیم (بر اساس گذر) ایجاد شده است و شامل خود معیار و معیارهایی است که از آن تاثیر می‌پذیرد، در حالی که توان وابستگی نشان‌دهنده تعداد عملکردهایی است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر آن معیار تاثیر می‌گذارند.

جدول شماره(۹): FRM نهایی با قدرت محرکه و سطح وابستگی.

عوامل	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	قدرت محرک ونفوذ
C1	۱	*۱	*۱	۱	۱	۱	*۱	*۱	۸

[68] Structural Self-Interaction Matrix
[69] Initial reachability matrix

C2	۰	۱	*۱	۰	۰	۱	۰	۰	۳
C3	۰	۱	۱	۰	۰	*۱	۰	۰	۳
C4	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸
C5	۰	*۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۴
C6	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۳
C7	۱	۱	۱	*۱	۱	۱	۱	۱	۸
C8	*۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸
قدرت وابستگی	۴	۸	۸	۴	۵	۸	۴	۴	

سطح سلسله مراتبی برای توابع پایداری Industry 4.0 در این مطالعه توسعه یافته است. با استفاده از مجموعه دسترس پذیری RS، مجموعه پیشین AS و ماتریس دسترسی نهایی توابع، پارتیشن‌های سطح مشخص می‌شوند. RS[70] یا مجموعه قابلیت دسترسی برای یک ویژگی، عنصر موجود در ردیف با مقدار "۱" شامل خود متغیرها است. و شامل مجموعه ای از متغیرهای تأثیرگذار است. AS[71] یا مجموعه پیشین برای هر عنصر موجود در ستون با مقدار "۱" از جمله خود متغیر را تشکیل می‌دهد(Kumar et al., 2021) و شامل مجموعه‌ای از متغیرهای تأثیرپذیر است. با در نظر گرفتن متغیرهای مشترک در AS و RS، (IS)[72] ایجاد می شود که شامل متغیرهای تکراری که در RS و IS یکسان است می باشد. این متغیر در بالای سطوح سلسله مراتبی ISM قرار می‌گیرد و باید گفت که این عنصر نمی‌تواند بر سایر عناصر بالای خود تأثیر بگذارد. این تکرارها ادامه یافت تا زمانی که همه عناصر در سطوح مختلف سلسله مراتبی ISM طبقه بندی شدند(Bagheri et al., 2023). اولین متغیری که اشتراک دو مجموعه آن برابر با مجموعه قابل دسترسی باشد، سطح اول خواهد بود. بنابراین عناصر سطح اول بیشترین تأثیرپذیری را در مدل خواهند داشت.

جدول شماره (۱۰): سطح بندی عملگرها در مرحله اول

متغیرها	قابلیت دسترسی(خروجی)	ورودی	اشتراک
C1	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8	C1,C4,C7,C8	C1,C4,C7,C8
C2	C2,C3,C6,	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8	C2,C3,C6,
C3	C2,C3,C6	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8	C2,C3,C6
C4	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8	C1,C4,C7,C8	C1,C4, ,C7,C8
C5	C2,C3, C5,C6	C1,C4,C5,C7,C8	C5
C6	C2,C3,C6	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8	C2,C3,C6
C7	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8	C1, C4,C7,C8	C1, C4,C7,C8
C8	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8	C1,C4,C7,C8	C1,C4,C7,C8

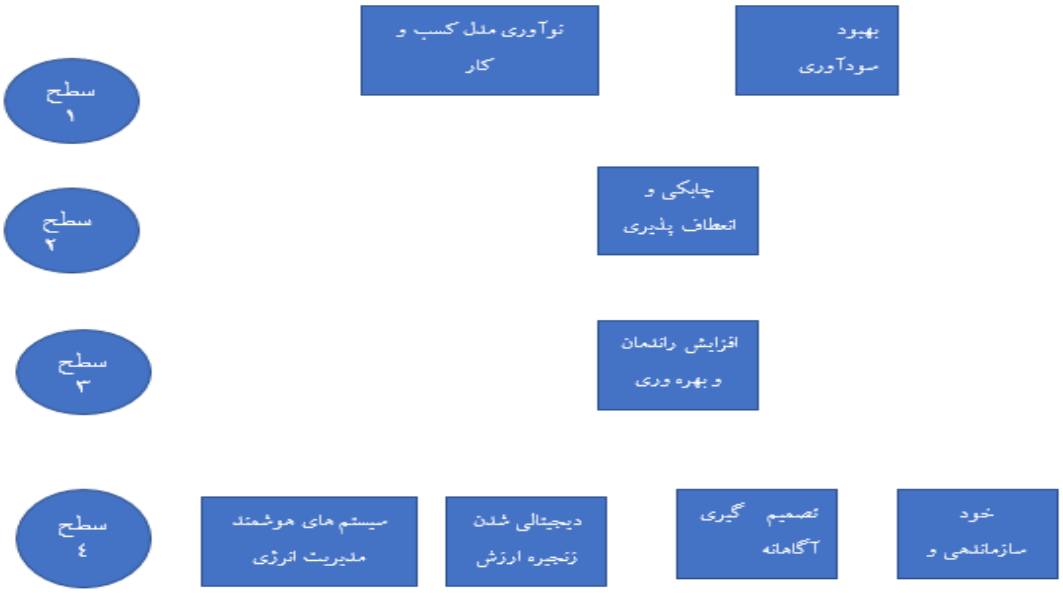
جدول ۱۰ سطوح سلسله مراتبی توابع تولید پایدار صنعت۴ را در تکرار اول فهرست می‌کند، که در آن عملکردهای C2و C3در دور اول استخراج می‌شوند. چرا که اشتراک بین دو مجموعه خروجی و ورودی آن برابر با مجموعه خروجی میباشد. پس از تعیین سطح اول، معیاری که سطح آن معلوم شده از تمامی مجموعه حذف شده و مجددا مجموعه ورودیها و خروجی‌ها را تشکیل داده و سطح متغیر بعدی به دست می‌آید و این کار تا مشخص شدن آخرین سطح ادامه پیدا میکند. روش استخراج به طور مکرر تکرار می شود تا سطح سلسله مراتبی همه توابع شناسایی شود. شکل ۲ سطح‌بندی نهایی شاخص‌ها را نمایش می‌دهد. پس از تعیین روابط وسطح بندی شاخصها، ماتریس قدرت نفوذ و وابستگی را میتوان تشکیل داد. جمع اعداد سطرهای هر متغیر میزان تأثیرپذیری و جمع ستونی هر متغیر میزان تأثیرگذاری آن بر متغیرهای دیگر را نشان میدهد (Shirdel et al., 2022). سطح یک شامل بهبود سودآوری شرکت و نوآوری مدل کسب و کار سطح دوم شامل چابکی و انعطاف پذیری تولید سطح سوم شامل افزایش راندمان و بهره وری تولید و سطح چهارم شامل خود سازماندهی و سازگاری، تصمیم‌گیری آگاهانه، دیجیتالی شدن زنجیره ارزش و سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی است. بنابراین می‌توان گفت متغیرهایی که در سطح چهارم قرار دارند جز

[70] reachability set
[71] antecedent set
[72] Intersection Set

مهم‌ترین متغیرها هستند. جدول۱۱ نیز نتیجه سطح بندی نهایی و میزان قدرت نفوذ و وابستگی هر متغیر را در ارتباط متقابل بین مؤلفه های صنعت نسل۴ و پایداری نشان می‌دهد. توابع پایداری صنعت ۴.۰ که در سطوح ۱ قرار گرفته اند، دو عملکرد چابکی تولید و بهره وری و کارایی تولید را که در سطح دوم و سوم قرار دارند تسهیل می‌کنند.کمک‌های صنعت ۴.۰ به چابکی و کارایی تولید شامل استفاده از فناوری هایی مانند هوش مصنوعی و ساخت افزودنی است. اصل قابلیت همکاری Industry 4.0 ارتباط قابل اعتماد و معنی دار اجزای تولیدی مانند اپراتورها، ماشین آلات، فرآیندها و تجهیزات را در تمام طول زنجیره ارزش تضمین می‌کند. هنگامی که این اصول با IIoT، و ربات‌ها ترکیب می‌شوند، منجر به چابکی بی‌نظیر و بهبود کارایی تولیدشده و به تولید فقط طبق خواسته مشتری می‌رسند. به طور کلی، عملکردها در سطوح ۱ تا ۳، اساساً ستون اقتصادی تولید پایدار را در سطوح شرکتی و زنجیره تامین امکانپذیر می‌کند. همچنین برای توانمندسازی و حمایت از نیروی انسانی از طریق خودکارسازی کارهای صنعتی ناایمن و ناخوشایند و همچنین جمع‌آوری زیادی از داده‌ها از تصمیم‌گیری آگاهانه جز عملگرهای مهم در سطح چهارم است حمایت می‌کند.

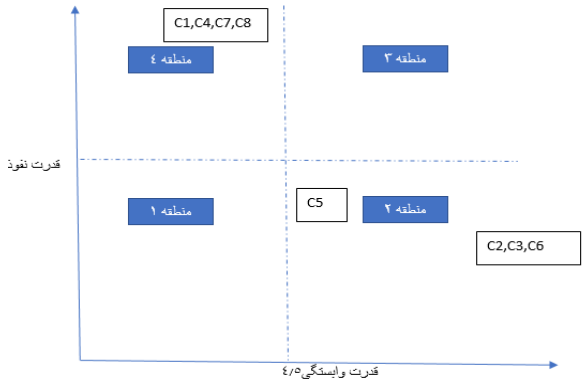
جدول شماره(۱۱): میزان قدرت نفوذ و وابستگی عملگرهای پایداری صنعت ۴

نام عملگر	ابعاد پایداری			نماد	میزان وابستگی	قدرت نفوذ	سطح
	اقتصادی	اجتماعی	زیست محیطی				
خود سازماندهی و سازگاری	*		*	C1	۴	۸	۴
نوآوری مدل کسب و کار		*		C2	۸	۳	۱
بهبود سودآوری شرکت	*			C3	۸	۳	۱
تصمیم گیری آگاهانه	*	*	*	C4	۴	۸	۴
افزایش راندمان و بهره وری تولید	*			C5	۵	۴	۳
چابکی و انعطاف پذیری تولید	*			C6	۸	۳	۲
دیجیتالی شدن زنجیره ارزش	*			C7	۴	۸	۴
سیستم های هوشمند مدیریت انرژی			*	C8	۴	۸	۴



شکل شماره (۲): سطح‌بندی عملگرهای پایداری صنعت نسل۴

تجزیه وتحلیل میک ماک: در این بخش از پژوهش، تجزیه و تحلیل طبقه‌بندی (MICMAC)[۷۳] برای شناسایی عملگرهای پایداری صنعت نسل۴ بر اساس قدرت محرک و وابستگی آنها، مورد استفاده قرار گرفته‌است. با کمک ماتریس دسترسی نهایی، قدرت محرک و وابستگی هر یک از عملگرهای شناسایی شده داده ها به چهار بخش/خوشه طبقه بندی شدند. منطقه اول متغیرهای خودمختار: اینها توابعی با قدرت محرکه ضعیف و همچنین قدرت وابستگی ضعیف هستند. منطقه دوم متغیرهای وابسته: اینها توابعی با قدرت محرکه و نفوذ ضعیف اما قدرت وابستگی قوی هستند. منطقه سوم متغیرهای پیوندی: اینها توابعی با قدرت محرک قوی و همچنین قدرت وابستگی هستند. منطقه چهارم متغیرهای مستقل: اینها توابعی هستند که قدرت محرکه قوی اما قدرت وابستگی ضعیفی دارند(Raut et al., 2017). به عنوان خروجی اصلی رویکرد MICMAC، شکل۳ خوشه‌های مختلف را بر اساس قدرت محرک و وابستگی بین شاخص‌ها و قابلیت های مورد مطالعه توضیح می‌دهد. این ماتریس نشان می‌دهد عملگرهایی که در ناحیه وابسته قرار گرفته اند، قدرت نفوذ کم و وابستگی بالایی دارند. وابستگی بالای آنها نشان از اولویت دسترسی به آنها را دارد. از طرفی عملگرهایی که در ناحیه رابط قرار دارند، قدرت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بالایی دارند و هر تغییر کوچکی بر این متغیرها باعث تغییرات اساسی در سیستم می‌شود. در مورد عملگرهایی که در ناحیه مستقل قرار دارند، باید گفت که آن‌ها تأثیرگذاری بالاو تأثیرپذیری کمی دارند. با تجزیه و تحلیل مدل ISM و نمودار خوشه ای (شکل۳) از روش MICMAC، می‌توان مشاهده کرد عملگرهای خودسازماندهی و سازگاری C1، تصمیم‌گیری آگاهانه C4 ، دیجیتالی‌شدن زنجیره ارزش C7 و سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی C8 به عنوان عوامل مستقل با رویکرد MICMAC طبقه بندی می‌شوند. بنابراین، می‌توان تشخیص داد که این سازه‌ها بر سایر سازه‌ها در مدل تأثیر می‌گذارند.



شکل شماره (۳): ماتریس قدرت محرک و وابستگی

نتایج این پژوهش توسط پژوهش‌هایی که بر تاثیر فناوری‌های دیجیتال بر جذب ارزش افزوده، طراحی اصول آن مانند قابلیت همکاری، مجازی‌سازی، جهت‌گیری خدمات و مدولار بودن و افزایش انعطاف‌پذیری در تولید، همراه با سفارشی‌سازی انبوه، کیفیت بهتر و بهره‌وری بهبود یافته را دارد، تایید می‌شود (Oztemel & Gursev, 2020; Strange & Zucchella, 2017; Zhong et al., 2017). مطالعه فیلهو و همکاران(۲۰۲۲) نشان می‌دهد کاربردی بودن پژوهش‌های مرتبط با صنعت نسل۴ و پایداری به عنوان راهنما برای دستیابی به اهداف توسعه عمل کرده و اثرات مثبتی مانند بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف برق و انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارد. مدیران می‌توانند از استراتژی‌های بازیابی مواد تجدیدپذیر و جایگزینی محصولات قدیمی برای ایجاد کارایی و افزایش پاسخگویی در زنجیره تامین استفاده کنند(Godinho Filho et al., 2022). نتایج پژوهش راوی و همکاران(۲۰۲۳) نیز تاییدی بر یافته‌های این پژوهش است چرا که نشان می‌دهد توابع پایداری اقتصادی مانند کارایی تولید و نوآوری در مدل کسب و کار، نتایج فوری صنعت ۴.۰ هستند، که راه را برای توسعه عملکردهای پایداری اجتماعی و زیست محیطی صنعت ۴ همراه با پایداری انرژی باز می‌کند(Ravi et al., 2023). اهمیت زیر ساخت‌های دیجیتالی و پلت فرم نوآوری سازگار با محیط زیست نیز در پژوهش بونیلا و همکاران(۲۰۱۸) تایید شده است. سطوح مختلف زیرساخت دیجیتالی می‌تواند زمینه‌هایی از نابرابری و الگوهای غیرپایداری ایجاد کند(Bonilla et al., 2018). با وجود اهمیت

[73] Matrices Impacts Croises Multiplication Applique´ and Classment

پیاده‌سازی صنعت نسل۴، این روندها همچنان چالش‌هایی را برای مدیران به همراه دارد. ناپختگی و کمبود نسبی نمونه‌های عملی اجرای فناوری‌ها با استفاده از ابزارهایی مانند بلاک‌چین، اینترنت اشیا و تولید افزودنی، بی‌اعتمادی و نگرانی در مورد تأثیرات بالقوه این اقدامات جدید تاثیرات منفی بر عملکرد سازمان‌ها ایجاد می‌کند. به کمک تکنیک ISM می‌توان این دو گرایش و نحوه استفاده از آنهارا با هم و جداگانه، برای بهبود عملکرد سازمانها بررسی کرد. مانند هر مطالعه تحقیقاتی دیگری، این مطالعه نیز برخی از محدودیت‌ها را مشخص کرده که راه را برای مسیرهای تحقیقاتی آینده هموار می‌کند. به عنوان مثال در روش دلفی فازی و ISM پاسخ‌های همه متخصصان را با وزن یکسانی در نظر می‌گیرد. بنابراین، در نظر نگرفتن وزن‌های مختلف برای هر متخصص هنگام پاسخگویی در حوزه تخصصی خود، ممکن است باعث ایجاد نتایج غیرواقعی در مدل شود. به این معنی که استفاده از ISM با استفاده از متخصصان خاص می‌تواند نتایج متفاوتی را با توجه به ویژگی‌های هر بخش ارائه دهد. بنابراین، مطالعه موضوع با استفاده از متخصصان در همان بخش می‌تواند احتمال مغایرت در پاسخ‌ها را کاهش داده و دقت بیشتری را برای مدل نهایی تضمین کند. دوم، تعداد زیاد اتصالات و ارتباطات، افشای همه آنها را در مدل ISM را غیرممکن می‌کند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از دیگر روش‌های MCDM،روش سیستم دینامیک(شبیه‌سازی) و یا الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی استفاده کرد. تحقیقات آتی باید با هدف اثبات بیشتر یافته‌های این مطالعه بوده و بر جنبه‌های منفی پیاده‌سازی I4.0 یعنی چالش‌ها و ریسک‌ها متمرکز شود.

٤- منابع

Akanbi, L. A., Oyedele, A. O., Oyedele, L. O., & Salami, R. O. (2020). Deep learning model for Demolition Waste Prediction in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *274*, 122843.

Amoozad Mahdiraji, H., Hafeez, K., Kord, H., & Abbasi Kamardi, A.(2022) .Analysing the voice of customers by a hybrid fuzzy decision-making approach in a developing country's automotive market. *Management Decision*, *60*(2), 399-425.

Amoozad Mahdiraji, H., Razavi Hajiagha, S. H., Jafari-Sadeghi, V., Busso, D., & Devalle, A. (2023). Towards financing the entrepreneurial SMEs: exploring the innovation drivers of successful crowdfunding via a multi-layer decision-making approach. *European Journal of Innovation Management*.

Bagheri, R., Zomorodi, P., & Rezaeian, A. (2024). Identifying and ranking key technological capabilities in supply chain sustainability using ISM approach: case of food industry in Iran. Environment, Development and Sustainability, 26(4), 9247-9284.

Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of production economics*, *229*, 107776.

Bashtannyk, V., Buryk, Z., Kokhan, M., Vlasenko, T., & Skryl, V. (2020). Financial, economic and sustainable development of states within the conditions of industry 4 .٠. *International journal of management*, *11*(4), 406-413.

Blunck, E., & Werthmann, H. (2017, October). Industry 4.0–an opportunity to realize sustainable manufacturing and its potential for a circular economy. In DIEM: Dubrovnik International Economic Meeting .3(1), 644-666.

Bonilla, S. H., Silva, H. R., Terra da Silva, M., Franco Gonçalves, R., & Sacomano, J. B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability*, *10*(10), 3740.

Braccini, A. M., & Margherita, E. G. (2018). Exploring organizational sustainability of industry 4.0 under the triple bottom line: The case of a manufacturing company. *Sustainability*, *11*(1), 36.

Cañas, H., Mula, J., & Campuzano-Bolarín, F. (2020). A general outline of a sustainable supply chain 4.0. *Sustainability*, *12*(19), 7978.

Ching, N. T., Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., & Asadi, S. (2022). Industry 4.0 applications for sustainable manufacturing: A systematic literature review and a roadmap to sustainable development. *Journal of cleaner production*, *334*, 130133.

Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. International Journal of production economics, 204, 383-394.

Dalmarco, G., Ramalho, F. R., Barros, A. C., & Soares, A. L. (2019). Providing industry 4.0 technologies: The case of a production technology cluster. *The journal of high technology management research*, *30*(2), 100355.

Dantas, T. E. T., de-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., Rodriguez, C. M. T., & Soares, S. R. (2021). How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. Sustainable production and consumption, 26, 213-227.

Dwivedi, A., Sassanelli, C., Agrawal, D., Gonzalez, E. S., & D'Adamo, I. (2023). Technological innovation toward sustainability in manufacturing organizations: A circular economy perspective. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *35*, 101211.

Ghadimi, P., Wang, C., Lim, M. K., & Heavey, C. (2019). Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains. *Computers & industrial engineering*, *127*, 588-600.

Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of cleaner production*, *252*, 119869.

Ghobakhloo, M., & Fathi, M. (2021). Industry 4.0 and opportunities for energy sustainability. *Journal of cleaner production*, *295*, 126427.

Godinho Filho, M., Monteiro, L., de Oliveira Mota, R., dos Santos Leite Gonella, J., & de Souza Campos, L. M. (2022). The relationship between circular economy, industry 4.0 and supply chain performance: a combined ISM/fuzzy MICMAC approach. Sustainability, 14(5), 2772.

Harikannan, N., Vinodh, S., & Gurumurthy, A. (2021). Sustainable industry 4.0–an exploratory study for uncovering the drivers for integration. *Journal of Modelling in Management*, *16*(1), 357-376.

Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., & Giallanza ,A. (2021). Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions. *Applied Sciences*, *11*(12), 5725.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. Sustainable Operations and Computers, 3, 203-217.

Jayakumar, J., K, J., KEK, V., & Hasibuan, S. (2020). Modelling of sharing networks in the circular economy. *Journal of Modelling in Management*, *15*(2), 407-440.

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 safety and environmental protection, 117, 408-425.

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Subramanian, N., Ghadge, A., Belhadi, A., & Venkatesh, M. (2023). Blockchain technology's impact on supply chain integration and sustainable supply chain performance: Evidence from the automotive industry. *Annals of Operations Research*, *327*(1), 575-600.

Kaswan, M. S., & Rathi, R. (2019). Analysis and modeling the enablers of green lean six sigma implementation using interpretive structural modeling. *Journal of cleaner production*, *231*, 1182-1191.

Kumar, P., Singh, R. K., & Kumar, V. (2021). Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. *Resources, conservation and recycling*, *164*, 105215.

Kumar, R., Singh, R. K., & Dwivedi, Y. K. (2020). Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges. *Journal of cleaner production*, *275*, 124063.

Kumar, S., Raut, R. D., Nayal, K., Kraus, S., Yadav, V. S., & Narkhede, B. E. (2021). To identify industry 4.0 and circular economy adoption barriers in the agriculture supply chain by using ISM-ANP. *Journal of cleaner production*, *293*, 126023.

Lieder, M., Asif, F. M., & Rashid, A. (2020). A choice behavior experiment with circular business models using machine learning and simulation modeling. *Journal of Cleaner Production*, *258*, 120894.

Luthra, S., Kumar, A., Zavadskas, E. K., Mangla, S. K., & Garza-Reyes, J. A. (2020). Industry 4.0 as an enabler of sustainability diffusion in supply chain: an analysis of influential strength of drivers in an emerging economy. *International Journal of Production Research*, *58*(5), 1505-1521.

Ma, S., Zhang, Y., Liu, Y., Yang, H., Lv, J., & Ren, S. (2020). Data-driven sustainable intelligent manufacturing based on demand response for energy-intensive industries. *Journal of Cleaner Production*, *274*, 123155.

Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, *58*(5), 1462-1484.

Machado, E., Scavarda, L. F., Caiado, R. G. G., & Thomé, A. M. T. (2021). Barriers and enablers for the integration of industry 4.0 and sustainability in supply chains of MSMEs. *Sustainability*, *13*(21) .١١٦٦٤ ,

Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & industrial engineering*, *127*, 925-953.

Marić, J., Opazo-Basáez, M., Vlačić, B., & Dabić, M.(2023) .Innovation management of three-dimensional printing (3DP) technology: Disclosing insights from existing literature and determining future research streams. *Technological Forecasting and Social Change*, *193*, 122605.

Maware, C., & Parsley, D. M.(2023) .Can industry 4.0 assist lean manufacturing in attaining sustainability over time? Evidence from the US organizations. *Sustainability*, *15*(3), 1962.

Meng, Y., Yang, Y., Chung, H., Lee, P.-H., & Shao, C. (2018). Enhancing sustainability and energy efficiency in smart factories: A review. *Sustainability*, *10*(12), 4779.

Moktadir, M. A., Rahman, T., Rahman, M. H., Ali, S. M., & Paul, S. K. (2018). Drivers to sustainable manufacturing practices and circular economy: A perspective of leather industries in Bangladesh. *Journal of cleaner production*, *174*, 1366-1380.

Ng, T. C., & Ghobakhloo, M. (2020). Energy sustainability and industry 4.0. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,

Olsen, S. (1982). Group Planning and Problem-Solving Methods in Engineering Management. *JOHN WILEY & SONS, INC., 605 THIRD AVE., NEW YORK, NY 10158, 1982*, *528*.

Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of intelligent manufacturing*, *31*, 127-182.

Pham, T. T., Kuo, T.-C., Tseng, M.-L., Tan, R. R., Tan, K., Ika, D. S., & Lin, C. J. (2019). Industry 4.0 to accelerate the circular economy: A case study of electric scooter sharing. *Sustainability*, *11*(23), 6661.

Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Connecting circular economy and industry 4.0. *International Journal of Information Management*, *49*, 98-113.

Rajput, S., & Singh, S. P. (2020). Industry 4.0 Model for circular economy and cleaner production. *Journal of cleaner production*, *277*, 123853.

Rajput, S., & Singh, S. P. (2022). Industry 4.0 model for integrated circular economy-reverse logistics network. *International Journal of Logistics Research and Applications*, *25*(4-5), 837-877.

Rana, J. A., & Jani, S. Y. (2023). Enhancing sustainable supply chain performance by adopting sustainable lean six sigma-Industry 4.0 practices. Management of Environmental Quality: An International Journal, 34(4), 1198-1221.

Raut, R. D., Narkhede, B., & Gardas, B. B. (2017). To identify the critical success factors of sustainable supply chain management practices in the context of oil and gas industries: ISM approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *68*, 33-47.

Ravi, C., Tomar, A., & Yadav, T. K. (2023). INDUSTRY 4.0: Digitalization and Sustainability Opportunities. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, *5*(1), 210-215.

Ribeiro, I., Matos, F., Jacinto, C., Salman, H., Cardeal, G., Carvalho, H., Godina, R., & Peças, P. (2020). Framework for life cycle sustainability assessment of additive manufacturing. *Sustainability*, *12*(3), 929.

Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6):1662-1687.

Sharma, H., Kumar, H., & Mangla, S. K. (2023). Enablers to computer vision technology for sustainable E-waste management. Journal of Cleaner Production, 412, 137396.

Shayganmehr, M., Kumar, A., Garza-Reyes, J. A., & Moktadir, M. A. (2021) .Industry 4.0 enablers for a cleaner production and circular economy within the context of business ethics: A study in a developing country. *Journal of cleaner production*, *281*, 125280.

Shibin, K., Gunasekaran, A., & Dubey, R. (2017). Explaining sustainable supply chain performance using a total interpretive structural modeling approach. *Sustainable Production and Consumption*, *12*, 104-118.

Shirdel, Saeeda, Dehghanan, Hamed, Taqifard Mohammad Taqi & Kafash, Mehdi. (2022). Identifying and leveling the components of sustainable human resource management in the banking industry. Strategic Management Studies Quarterly, 13(49), 283-298.[in persian]

Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process safety and environmental protection*, *118*, 254-267.

Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *procedia CIRP*, *40*, 536-541.

Strange, R., & Zucchella, A. (2017). Industry 4.0, global value chains and international business. *Multinational Business Review*, *25*(3), 174-184.

Suleiman, Z., Shaikholla, S., Dikhanbayeva, D., Shehab, E., & Turkyilmaz, A. (2022). Industry 4.0: Clustering of concepts and characteristics. Cogent Engineering, 9(1), 2034264.

Taslimi, Maryam, Qadiklaei, Abdulhamid & Valipour Khatir, Mohammad. (2023). The structural model of the analysis of the new components of the workforce in the automobile industry considering the Internet of Industrial Objects. *Sustainable human resource management*,5(9), [in persian].

Tolettini, L., & Di Maria, E. (2023). Structuring and Measuring Environmental Sustainability in the Steel Sector: A Single Case Study. *Sustainability*, *15*(7), 6272.

Tseng, M.-L., Tan, R. R., Chiu, A. S., Chien, C.-F., & Kuo, T. C. (2018). Circular economy meets industry 4.0: can big data drive industrial symbiosis? *Resources, conservation and recycling*, *131*, 146-147.

Vacchi, M., Siligardi, C., Cedillo-González, E. I., Ferrari, A. M., & Settembre-Blundo, D. (2021). Industry 4.0 and smart data as enablers of the circular economy in manufacturing: Product re-engineering with circular eco-design. *Sustainability*, *13*(18), 10366.

Viles, E., Kalemkerian, F., Garza-Reyes, J. A., Antony, J., & Santos, J. (2022). Theorizing the Principles of Sustainable Production in the context of Circular Economy and Industry 4.0. *Sustainable Production and Consumption*, *33*, 1043-1058.

Wiegand, T., & Wynn, M. (2023). Sustainability, the circular economy and digitalisation in the German textile and clothing industry. Sustainability, 15(11), 9111.

Xin ,L., Lang, S., & Mishra, A. R. (2022). Evaluate the challenges of sustainable supply chain 4.0 implementation under the circular economy concept using new decision making approach. *Operations Management Research*, *15*(3-4), 773-792.

Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, *3*(5), 616-630.

Leveling Opportunities for the Sustainability of the 4th Generation Industry and Digitalization Using the Interpretive Structural Technique (ISM)

Seyed khadije Hosseini
Ph.D. Candidate, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran
Mansour Momeni (Corresponding Author)
Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management University of Tehran, Tehran, Iran
Email: mmomeni@ut.ac.ir
Ali Haji Gholam Saryazdi
Department of Systems Dynamics, Faculty of Management, Imam Javad

Abstract

The digital revolution, a key aspect of the fourth industrial revolution (Industry 4.0), is fundamentally transforming how people live and work. There is a growing optimism within society regarding the sustainability opportunities that Industry 4.0 can provide. This article aims to evaluate the relationship between Industry 4.0 and sustainability opportunities that enhance supply chain management performance. It also seeks to assist stakeholders and industrialists in understanding the potential benefits of the digital revolution for sustainability. To achieve this objective, we conducted a comprehensive review of the research literature and identified 24 sustainability frameworks relevant to the fourth industrial revolution. After localizing the indicators using the fuzzy Delphi method, we employed a combination of Interpretive Structural Modeling (ISM) and the MICMAC approach, utilizing MATLAB and Excel software to establish mutual relationships and hierarchically categorize these criteria. This stratification has led to a deeper understanding of Industry 4.0's performance and its impact on three distinct dimensions of sustainability, which represents a significant innovation of this research. The primary finding reveals that self-organization and adaptation, informed decision-making, digitalization of the value chain, and intelligent energy management systems are foundational elements within the structural model. Our study can serve as a basis for future empirical research to explore how companies integrate and implement Industry 4.0 technologies in their operations and the subsequent effects on the sustainability of their supply chains.

Keywords: Fourth industrial revolution, sustainability, fuzzy Delphi, ISM method, MICMAC method.