Industrial Management Perspective

Print ISSN: 2251-9874, Online ISSN: 2645-4165
Volume 13, Serial Number 49, Spring 2023, Pages 141-172 (Original Article)
DOI: 10.52547/JIMP.13.1.141

Modeling the Enablers of Industry 4.0 in the Implementation of a Sustainable Supply Chain with Fuzzy DEMATEL-ANP

Seyyed Alireza Rokneddini[*]، Davod Andalib Ardakani[**]،
Habib Zare Ahmadabadi[***]،
Seyyed Mojtaba Hosseini Bamkan[****]

Abstract

The purpose of this paper is to identify the enablers of Industry 4.0 supply chain sustainability and further attempt to propose a research framework to bridge the theoretical gaps. At first, the enablers that influence the adoption of sustainability capability were identified through the review of domestic and foreign articles using the meta-combination method. After identification, the enablers were compared through a questionnaire and provided to 12 experts in the field of tile manufacturing industries in Yazd province. Using the information obtained from the questionnaire and its analysis through the combined method of DEMATEL-Fuzzy Network Analysis Process, a model was ultimately presented. The research results of the meta-combination section identified 114 open codes, 26 central codes, and finally 7 selective codes. The selected codes include organizational, production system, environmental, product, economic, technological, and social factors, which were analyzed using the combined method of Fuzzy Dematel-ANP. The relations and importance of these enablers were examined, and It was determined that the "technology" dimension is the most influential, the "product" dimension is the most susceptible, and the "economic" dimension is the most important dimension.

Keywords: Industry 4.0; Industry 4.0 enablers; Sustainable supply chain; Supply chain; Sustainability.

Received: Nov. 26, 2022; Accepted: Jan. 31, 2023.
* Ph.D Student, Yazd University.
** Associate Professor, Yazd University (Corresponding Author).
Email: andalib@yazd.ac.ir
*** Associate Professor, Yazd University.
**** Assistant Professor, Yazd University.

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

سال سیزدهم، شماره ۴۹، بهار ۱۴۰۲، ص‌ص ۱۴۱– ۱۷۲ (**نوع مقاله: پژوهشی**)

DOI: 10.52547/JIMP.13.1.141

مدل‌سازی توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار با رویکرد دیمتل- فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی

سید علیرضا رکن‌الدینی*، داود عندلیب اردکانی، حبیب زارع احمدآبادی***، سید مجتبی حسینی بامکان*****

چکیده

هدف این پژوهش، شناسایی توانمندسازهای صنعت ۴.۰ پایداری زنجیره تأمین و تلاش بیشتر برای پیشنهاد یک چارچوب پژوهشی برای پل‌زدن به شکاف‌های نظری است. ابتدا توانمندسازهایی که بر اتخاذ قابلیت پایداری تأثیر می‌گذارند از طریق مرور مقاله‌های داخلی و خارجی به‌وسیله روش فراترکیب شناسایی شد و پس از شناسایی، توانمندسازها به‌صورت پرسشنامه مقایسه زوجی درآمد و در اختیار ۱۲ نفر از خبرگان حوزه صنایع تولیدی کاشی در استان یزد قرار گرفت. با اطلاعات به‌دست‌آمده از پرسشنامه و تحلیل آن با استفاده از روش ترکیبی دیمتل ـ فرایند تحلیل شبکه‌ای فازی درنهایت مدلی ارائه شد. از نتایج پژوهش بخش فراترکیب ۱۱۴ کُد باز، ۲۶ کُد محوری و درنهایت ۷ کُد انتخابی استخراج شد که کُدهای انتخابی شامل عوامل سازمانی، سیستم تولید، محیط‌زیست، محصول، اقتصادی، فناوری و اجتماعی است که در روش ترکیبی دیمتل ـ فرایند تحلیل شبکه‌ای فازی، روابط و اهمیت این توانمندسازها بررسی و مشخص شد که بُعد «فناوری» تأثیرگذارترین، بُعد «محصول» تأثیرپذیرترین و بُعد «اقتصادی» مهم‌ترین ابعاد محسوب می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: صنعت ۴.۰؛ توانمندسازهای صنعت ۴.۰؛ زنجیره تأمین پایدار؛ زنجیره تأمین؛ پایداری.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱.

* دانشجوی دکتری، دانشگاه یزد.

** دانشیار، دانشگاه یزد (نویسنده مسئول).

Email: andalib@yazd.ac.ir

*** دانشیار، دانشگاه یزد.

**** استادیار، دانشگاه یزد.

۱. مقدمه

دولت فدرال آلمان در سال ۲۰۱۱ اصطلاح صنعت ۴.۰ را به‌عنوان عنصری از طرح فناوری پیشرفته این کشور برای ارتقای قابلیت صنعتی از طریق تولید دیجیتال معرفی کرد [۳۵، ۹۶]. در تحولات سریع فرآیندهای تولید و اتوماسیون تجاری، صنعت ۴.۰ به‌عنوان انقلاب صنعتی چهارم نامگذاری شده است که به مدیریت کارآمد سیستم‌های پیچیده با یکپارچه‌سازی کاربرد اینترنت اشیا[1] (IoT) و خدمات فناوری اطلاعات به ایجاد یک محیط هوشمند کمک می‌کند [۶۶، ۵۷]. صنعت ۴.۰ به اشکال مختلف در سازمان ادغام می‌شود؛ یعنی به‌صورت افقی در سراسر شبکه‌های ارزش و به‌صورت عمودی در سراسر سیستم‌های تولید که عمدتاً توسط فناوری‌های مبتنی بر اینترنت مانند محاسبات ابری، سیستم‌های فیزیکی ـ سایبری، تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ، روباتیک، گرافیک بصری، شبکه‌های هوشمند، تولید توزیع‌شده و غیره هدایت می‌شود [۸]. فناوری مبتنی بر اینترنت ابزاری برای اتصال تجهیزات، شبکه‌ها و افراد در هر کجا که لازم باشد، فراهم می‌کند [۲۵]. درواقع اهداف صنعت ۴.۰ را می‌توان ایجاد شبکه‌ای از محصولات هوشمند، فرآیندهای تولید و ماشین‌آلات نام برد. از منظر مدیریتی، سازمان‌ها باید الزامات توسعه و طراحی سریع محصول و همچنین تولید سریع و انعطاف‌پذیر در محیط‌های تجاری را برآورده سازند [۸]؛ زیرا صنعت ۴.۰ ظرفیت زیادی برای تأثیرگذاری بر شبکه‌های زنجیره تأمین، فرآیندها و مدل‌های تجاری دارد؛ بنابراین کارخانه‌ها و زنجیره‌های تأمین را به‌گونه‌ای تجسم می‌کند که محصولات و تجهیزات همگی از طریق اینترنت به هم مرتبط می‌شوند، با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و داده‌ها و فرآیندهای موجود در سیستم را از طریق سیستم‌های سایبری ـ فیزیکی مبادله/ جمع‌آوری/ تحلیل می‌کنند. درواقع مفهوم «صنعت ۴.۰» به توسعه‌ای اشاره دارد که اساساً صنایع سنتی را تغییر می‌دهد [۱۳]. این تغییرات در زنجیره تولید محصولات و خدمات جدید ارائه‌شده به بازار، فرصت‌های جدید (محصولات هوشمند) و چالش‌های جدید (آماده‌سازی مردم برای استفاده از آن‌ها)، ساده‌سازی و بهره‌وری فرآیند تولید در تقابل با سرمایه‌گذاری برای فناوری مجدد صنعت و بهینه‌سازی لجستیک در مقابل انبار ذخیره داده حاصل می‌شود [۷۲، ۲۲].

از طرفی مطمئناً صنعت ۴.۰ و پایداری پیوند قوی دارند [۵۷]. صنعت ۴.۰ دیدگاه پایداری را از نظر بهبود کارایی اقتصادی ـ زیست‌محیطی ـ اجتماعی فرآیندها، کنترل انتشار کربن، کاهش ضایعات و صرفه‌جویی در منابع و بهبود سبک زندگی برای مشتریان یا نسل‌های آینده تشکیل می‌دهد [۸۱]. صنعت ۴.۰ ترکیبی از دیجیتالی‌شدن و هوشمندی عملیات و فرآیندهای تجاری است و دامنه کاربرد وسیعی در حوزه‌های مختلف دارد؛ بنابراین، بخش‌های صنعتی نمی‌توانند تأثیر مهم و اساسی صنعت ۴.۰ بر زنجیره‌های تأمین و پایداری آن‌ها را نادیده بگیرند [۵۶]. در

1. Internet of Thing

انجام این کار، مدیران تولید باید رویکردهای صنعت ۴.۰ و تحولات صنعتی را برای دستیابی به اهداف پایداری زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی خود یکپارچه کنند [۲۰]؛ همچنین صنایع باید به‌طور مؤثر تکنیک‌ها و روش‌های مربوط به صنعت ۴.۰ را برای شکل‌دادن به فرآیندها و عملیات خود برای توسعه پایدار در زمینه زنجیره تأمین اعمال کنند [۸۷]. صنایع می‌دانند که صنعت ۴.۰ چالش‌ها و تأثیرات خاص خود را در اجرای آن دارد [۴۰]؛ اما درعین‌حال دارای ظرفیتی برای کمک به پایداری زیست‌محیطی ـ اقتصادی ـ اجتماعی است [۵۲]. درواقع مدیریت زنجیره تأمین پایدار زمانی مطلوب در نظر گرفته می‌شود که اتخاذ شیوه‌های پایدار دفع زباله و یکپارچگی تأمین‌کنندگان را بهبود بخشد [۵۸]. صنعت ۴.۰ به بهبود فرآیندهای موجود، جریان مواد، کاهش کالاهای آسیب‌دیده و زمان انتظار در سراسر زنجیره تأمین کمک می‌کند [۵۶]. زمان‌بندی هوشمند وظایف، شفافیت، انعطاف‌پذیری، کیفیت و سفارشی‌سازی فرآیند را بهبود می‌بخشد [۴۷]؛ همچنین سیستم‌های انرژی هوشمند به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کنند. محیط‌های تولید هوشمند به بهبود مدیریت چرخه عمر محصول منجر می‌شود که به کاهش ضایعات، بازیافت بهتر و مصرف منابع و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند [۵۷].

سه انقلاب صنعتی قبلی شاهد بهبود قابل‌توجهی در بهره‌وری شرکت‌ها بوده‌اند. انقلاب‌های صنعتی گذشته تنها بر سطح طبقه فروشگاه تأثیر داشت. انقلاب صنعتی چهارم یک مفهوم پیشرفته‌تر است و بهره‌وری را با درگیرکردن توابع پشتیبانی مانند مهندسی بسیار بیشتر تحریک می‌کند [۸۳]. بااین‌حال جنبه تاریک تمام انقلاب‌های صنعتی قبلی بی‌توجهی به ابعاد اجتماعی و محیطی بوده است؛ به‌علاوه اطلاعات محیطی نابرابر بین شرکت و مشتریان (هم داخلی و هم خارجی) وجود دارد. اجرای موفق هر پروژه و توانایی شرکت برای انجام آن به‌شدت به منابع وابسته است؛ بنابراین فرصت زیادی برای اعمال نظریه فناوری اطلاعات و مطالعه سازوکار صنعت ۴.۰ در هدایت پایداری زنجیره تأمین وجود دارد. برای زنجیره تأمین پایدار، محصولات باید توسط فرایندهای سازگار با محیط‌زیست، زیست‌پذیر اجتماعی و بُعد اقتصادی تولید شوند. سیستم‌های تولید مبتنی بر فرآیندهای تولید پایدار برای صرفه‌جویی در هزینه، به‌دلیل کاهش ضایعات بسته‌بندی، کاهش هزینه‌های ایمنی و سلامت، محیط کاری بهتر، هزینه پایین جابه‌جایی نیروی کار، هزینه پایین نیروی کار، راهنمایی در شکل‌دادن به مقررات آینده، زمان هدایت کوتاه‌تر و کیفیت محصول بهتر بسیار کارآمد هستند. به‌طورکلی می‌توان اهمیت و ضرورت این پژوهش را در مزایا و نقش تعیین‌کننده‌ای که توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار دارد، توجیه کرد. در برخی از پژوهش‌ها، صنعت ۴.۰ موضوعی است که در حال حاضر توجه بسیاری از پژوهشگران دانشگاهی، به‌ویژه در زمینه تولید/ مهندسی را به خود جلب می‌کند؛ اما کمتر تأثیر گسترده‌تر این فناوری‌ها و اینکه چگونه ماهیت داده‌محور آن‌ها به دیجیتالی‌کردن زنجیره‌های تأمین پایدار کمک می‌کند، بررسی شده است. این فناوری‌ها

می‌توانند نقش مهمی در آینده زنجیره تأمین پایدار ایفا کنند و به سمت اکوسیستم زنجیره تأمین هوشمندتر، با ارتباط بهتر و حوزه‌های کاربردی بالقوه زنجیره تأمین برای فناوری‌های صنعت ۴.۰ حرکت کنند؛ ازاین‌رو پژوهش حاضر با بهره‌گیری از اصول و قواعد علمی در پی آن است که توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار را به‌صورت جامع موردبررسی قرار دهد تا مبنایی برای مقایسه با مدل‌های متداول به کارگرفته شده باشد. شایان‌ذکر است مهم‌ترین سؤال‌ها این پژوهش عبارت‌اند از: مؤلفه‌های توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار کدام‌اند؟ مدل توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار چگونه است؟

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

آغاز انقلاب صنعتی اصلی در اواخر قرن ۱۸ بود؛ یعنی زمانی که تأسیسات تولید مکانیکی با ماشین‌های آب و بخار کار می‌کردند. دومین انقلاب صنعتی در آغاز قرن بیستم، هنگامی که تولید انبوه با استفاده از برق و تقسیم‌کار امکان‌پذیر شد، شروع به آشکارشدن کرد. سومین انقلاب صنعتی که هنوز در حال پیشرفت است، در دهه ۱۹۷۰ آغاز شد. انقلاب صنعتی سوم با سطح بالاتری از اتوماسیون تولید و فرآیندهای کاری مختلف مشخص شد که از طریق کاربرد صنعتی فناوری اطلاعات و اطلاعات به‌دست آمده است [۲۶]. مفهوم صنعت ۴.۰ ابتدا توسط کاگرمن[1] و همکاران (۲۰۱۵) بیان شد و پایه و اساس این پدیده نوظهور را ایجاد کرد. آن‌ها آلمان را به‌عنوان یک کشور پیشرو در بخش تولید شناسایی کردند که در آن صنعت ۴.۰ می‌تواند به بهترین نحو اجرا شود و دنیای واقعی را با دنیای مجازی که در حال ایجاد کارخانه‌های هوشمند هستند، ترکیب کنند. در واقع صنعت ۴.۰ یک ساختار آینده‌نگر است که تکامل سیستم‌های تولید مستقل را با کاربرد اینترنت اشیا، سیستم‌های فیزیکی سایبری و هوش مصنوعی می‌سازد [۷۰]. فناوری‌های جدید مبتنی بر حسگر به شرکت‌ها در نظارت مستمر با استفاده از ماشین، نیازهای انرژی و آموزش کارکنان کمک می‌کنند. با تجزیه‌وتحلیل کامل فناوری‌های صنعت ۴.۰ داده‌ها از دستگاه‌های اینترنت اشیا مختلف می‌توانند برای بهبود پایداری عملیات‌های تولیدی خود استفاده کنند [۷۹]. برای زنجیره تأمین پایدار، محصولات باید با استفاده از فرآیندهای سالم محیطی، سازگار با محیط‌زیست و اقتصادی ساخته شوند. زنجیره تأمین مبتنی بر فرآیندهای تولید پایدار در صرفه‌جویی در انرژی و منابع طبیعی بسیار مؤثر هستند. شیواجی[2] و همکاران (۲۰۱۹)، اطمینان یافته‌اند که فرآیندهای تولید می‌توانند با استفاده مؤثر از دیجیتال‌سازی فرآیند و ابزارهای کنترل

1. Kagermann
2. Shivajee

کیفیت، کارآمد و پایدار شوند. با توجه به پژوهش بییر[1] و همکاران (۲۰۲۰)، صنعت ۴.۰ ساختاری «اجتماعی فنی» است که در آن چشم‌اندازهای سازمان که شامل تکنولوژی، اجتماعی و سازمانی است، در تعامل هستند. ارتباط پایداری با صنعت ۴.۰ باید در عمق مطالعه شود. برای صرفه‌جویی در انرژی، کاهش قراضه و تأثیر آن بر محیط‌زیستف زنجیره تأمین صنعتی باید به سمت پایداری سوق داده شود [۲۳]. از طرفی وقتی که معیارهای زیست‌محیطی در سراسر چرخه عمر محصولات به‌کار گرفته می‌شوند، نوآوری‌ها به عملیات پایدار منجر می‌شوند. پیاتاناوونگ[2] و همکاران (۲۰۱۹) مشاهده کرده‌اند که دانش، سرمایه‌گذاری و آموزش مفاهیم پایداری، الزامات حیاتی برای اجرای اقدامات پایدار در سازمان‌های تولیدی تایلند هستند. بهره‌وری و صرفه‌جویی انرژی از فرآیندهای تولیدی را می‌توان با اتخاذ فناوری جدید بهبود بخشید. انواع فناوری های جدید قادر هستند به میزان زیادی با کاهش جای پای کربن و جایگزین نمودن انرژی تجدیدپذیر، راه‌حل‌های مناسبی را برای افراد و جامعه، به میزان قابل‌توجهی پیشنهاد دهند [۴۳]. تکامل صنعت ۴.۰ به استفاده بهینه از منابع به شیوه‌ای شفاف‌تر کمک می‌کند. با استفاده از مجموعه تصمیمات صنعت ۴.۰، بهره‌وری تولید و نوآوری می‌تواند بهبود یابد که بر پایداری اجتماعی و محیطی تأثیر می‌گذارد [۲۶]. تاکور و مانگلا[3] (۲۰۱۹)، معتقدند که متخصصان کشورهای درحال‌توسعه باید بر جنبه‌های انسانی، عملیاتی و فناورانه زنجیره‌های تأمین پایدار در سازمان‌های تولیدی لوازم‌خانگی تأکید کنند. قوانین و حمایت دولت، آگاهی از حفاظت از محیط‌زیست و فناوری‌های اطلاعات، اجزای تعیین‌کننده برای اجرای اقتصاد دایره‌ای هستند [۱۲]. سزارینو[4] و همکاران (۲۰۱۹) مشاهده کردند که با انجمن صنعت ۴.۰، عملیات تولید ممکن است پایدار شود. در پژوهش‌های داخلی اصلانی و همکاران (۱۴۰۰)، توانمندی‌های چندگانه زنجیره تأمین پایدار بر پایه هوش مصنوعی شامل توانمندی رقابت‌پذیری، عملیاتی، فناوری و تاب‌آوری را ارزیابی کردند [۶]. راه‌چمنی و همکاران (۱۴۰۱)، برای زنجیره تأمین هوشمند خدمات به مؤلفه‌هایی مانند جریان اطلاعات هوشمند، جریان منابع مالی هوشمند و فناوری اطلاعات، ارتباطات هوشمند، شفافیت، اشتراک‌گذاری و نیروی انسانی متخصص اشاره کرده‌اند [۷]. بهرامی و همکاران (۱۴۰۱)، در پژوهش خود به تحلیل مؤلفه‌های مؤثر بر ارزیابی آمادگی صنعت نسل چهارم پرداختند و فقط به آمادگی نسل چهارم اشاره کردند [۸۵]؛ بااین‌حال مطالعات بسیار کمی به توانمندسازهای مربوط به فناوری‌های جدید اشاره کرده‌اند. پژوهشگران در مبانی نظری موجود فهرستی از توانمندسازهای مؤثر بر پایداری را به تصویر کشیده‌اند [۳۱]؛ اما این مطالعات نتوانسته‌اند پیوندی بین چگونگی تأثیر این توانمندسازها بر پذیرش پایداری در زنجیره

1. Beier
2. Piyathanavong
3. Thakur & Mangla
4. Cezarino

تأمین ایجاد کنند؛ همچنین در چندین پژوهش بر اساس توانمندسازها برای اتخاذ قابلیت پایداری در سازمان‌های تولیدی، تنها از تحلیل تجربی به‌عنوان ابزاری برای اعتبارسنجی چارچوب استفاده کرده‌اند [۲۷، ۱۰۰]؛ در صورتی که ضروری است که از رویکرد معیارهای تصمیم‌گیری استفاده شود. پژوهش‌های مختلف داستان‌های موفقیت به‌کارگیری فناوری جدید در کشورهای توسعه‌یافته را به اشتراک گذاشته‌اند. بااین‌حال مطالعات بسیار کمی قادر به دستیابی پایداری در میان سازمان‌های تولیدی در اقتصادهای درحال‌توسعه بوده‌اند. مطالعات اندکی یک چارچوب خاص توانمندسازها را توسعه داده‌اند و تنها فناوری، سازمان و محیط را برای افزایش پذیرش پایداری در نظر گرفته‌اند [۳، ۱۰۱]. بااین‌حال این چارچوب‌ها تأیید نشده‌اند و ازاین‌رو کاربرد آن‌ها سؤال‌برانگیز است؛ بنابراین در پژوهش حاضر تلاش می‌شود تا توانمندسازهای کلیدی صنعت ۴.۰ بررسی شود که به‌طور مستقیم زنجیره تأمین پایدار را در سازمان‌های تولیدی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

روش پژوهش حاضر از نظر هدف توصیفی ـ پیمایشی، از نظر نوع استفاده توسعه‌ای ـ کاربردی و بر اساس ماهیت داده‌ها کیفی ـ کمّی و بر اساس روش جمع‌آوری داده‌ها کتابخانه‌ای و میدانی (پرسشنامه) است. برای شناسایی مؤلفه‌های توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار از روش فراترکیب در بخش کیفی برای ارزیابی منابع علمی استفاده شد. ازآنجاکه پژوهش‌های کیفی فراوانی در حوزه توانمندسازهای صنعت ۴.۰ انجام شده، اما تاکنون مدل جامعی که تمام ابعاد را پوشش دهد، ارائه نشده است، روش فراترکیب برای شناسایی و ترکیب جامع از مؤلفه‌ها و ابعاد توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار به‌کار رفت؛ ازاین‌رو برای بهره‌گیری از روش فراترکیب از روش هفت‌مرحله‌ای سندلوسکی و باروسو[1] (۲۰۰۷)، استفاده شد که شامل فرآیند زیر است: ۱. تنظیم سؤال پژوهش؛ ۲. مرور مبانی نظری به شکل سیستماتیک؛ ۳. جست‌وجو و انتخاب متون مناسب؛ ۴. استخراج اطلاعات متون؛ ۵. تجزیه‌وتحلیل یافته‌های کیفی؛ ۶. کنترل کیفیت؛ ۷. ارائه یافته‌ها. در این بخش بعد از شناسایی مؤلفه‌های توانمندسازهای صنعت ۴.۰، نیاز به ایجاد اهمیت نسبی هر سنجه برحسب وزنی است که تعیین‌کننده نقش آن برای توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین است. برای تعیین اهمیت نسبی سنجه‌های مورداستفاده در تعیین توانمندسازها از تکمیل پرسشنامه و تکنیک تحلیل فرایند شبکه‌ای استفاده شده است. در ادامه برای ارائه مدل از تکنیک دیمتل فازی استفاده شده است. جامعه آماری این پژوهش در بخش کیفی از مبانی نظری و در بخش

1. Sandelowski & Barros

کمّی نیز کارشناسان و خبرگان حوزه فناوری اطلاعات در صنایع تولیدی کاشی در استان یزد بودند که حداقل ۱۰ سال سابقه کار داشتند. خبرگان علاوه بر خبرگی در زمینه فناوری اطلاعات و سابقه در صنایع تولیدی کاشی به مفاهیم زنجیره تأمین نیز آشنا بودند؛ بنابراین نمونه‌ای متشکل از ۱۲ نفر از خبرگان این حوزه به‌صورت هدفمند و با استفاده از روش نمونه‌گیری قضاوتی انتخاب شد.

دیمتل فازی[1]. در این پژوهش برای تعیین روابط علت و معلولی و تعیین میزان در جهت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری هر یک از ابعاد و توانمندسازها از دیمتل فازی مطابق با مراحل زیر استفاده شده است:

گام نخست: عوامل ارزیابی که دارای ماهیت ارتباطات علّی هستند و معمولاً تعداد زیادی از حالات پیچیده را دربرمی‌گیرند تدوین و برای مواجهه با ابهام قضاوت انسانی مقیاس کلامی فازی طبق الگوی جدول ۱، طراحی شد.

جدول ۱. اعداد فازی مثلثی متغیرهای کلامی میزان اثرگذاری ابعاد و چالش‌ها در یکدیگر

متغیر کلامی	مقیاس عددی	اعداد فازی مثلثی متناظر
بدون تأثیر	۰	(۰/۲۵ و ۰ و ۰)
تأثیر خیلی کم	۱	(۰/۵ و ۰/۲۵ و ۰)
تأثیر کم	۲	(۰/۷۵ و ۰/۵ و ۰/۲۵)
تأثیر زیاد	۳	(۱ و ۰/۷۵ و ۰/۵)
تأثیر خیلی زیاد	۴	(۱ و ۱ و ۰/۷۵)

گام دوم: نظر خبرگان جمع‌آوری و میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود. بدین منظور با درنظرگرفتن تعداد P خبره، P ماتریس Z^1، Z^2، Z^P ، به‌دست می‌آید که هر درایه آن‌ها با اعداد فازی مربوط مشخص می‌شدند. برای محاسبه ماتریس میانگین از رابطه$x = \frac{Z1+Z2+\cdots ZP}{P}$ استفاده شد. این ماتریس «ماتریس فازی اولیه روابط مستقیم» نامیده می‌شود؛ به‌صورتی که در آن $Z_{IJ}=(l_{ij}+m_{ij}+u_{ij})$ (مقدار هر درایه از ماتریس Z) اعداد فازی مثلثی هستند. درضمن با توجه به اینکه عناصر قطر اصلی صفر بودند، در ماتریس به‌صورت (۰، ۰، ۰) مشخص شدند.

گام سوم: از طریق رابطه ۱ که رابطه استانداردسازی است، مقیاس‌های شاخص‌ها به مقیاس‌های قابل‌مقایسه، تبدیل می‌شوند. در رابطه ۱، ماتریس X «ماتریس فازی روابط مستقیم استانداردشده» نامیده می‌شود:

1. Fuzzy dematel

رابطه (۱)

$$a_{ij} = (\sum_{j=1}^{i} lij. \sum_{j=1}^{i} mij. \sum_{j=1}^{i} uij)$$

$$r = max(\sum_{j=1}^{i} uij)$$

$$1 \le i \le n$$

$$x_{ij} = \frac{\text{Zij}}{\text{r}} = (l'ij.m'ij.u'ij)$$

گام چهارم: ماتریس فازی روابط مجموع T به‌دست می‌آید.

$$XI = [I''ij].\ Xm[m''ij]Xu[u''ij]$$

با توجه به اینکه t_{ij}=(I''$_{ij}$ ،m''$_{ij}$ ،u''$_{ij}$) است، داریم:

رابطه (۲)

$$[I''ij] = X_I \times (I - X_I)^{-1}$$

$$[m''ij] = X_m \times (I - X_m)^{-1}$$

$$[u''ij] = X_u \times (I - X_u)^{-1}$$

در رابطه ۲، I ماتریس یکه X_I،X_m،X_u هر کدام ماتریس $n \times n$ هستند که درایه‌های آن به‌ترتیب عدد پایین، عدد میانی و عدد بالایی اعداد فازی مثلثی ماتریس X را ایجاد می‌کند.

گام پنجم: به‌دست‌آوردن مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس T که با استفاده از روابط زیر به‌دست می‌آیند.

رابطه (۳)

$$\tilde{D} = (\tilde{D}_i)_{n\times 1} = [\sum_{j=1}^{n} \tilde{T}_{ij}]_{n\times 1}$$

$$\tilde{R} = (\tilde{R}_i)_{1\times n} = \left[\sum_{j=1}^{n} \tilde{T}_{ij}\right]_{1\times n}$$

در رابطه ۳، $\tilde{D}$ و $\tilde{R}$ به‌ترتیب ماتریس $n \times 1$ و $1 \times n$ هستند.

گام ششم: مشخص‌کردن میزان اهمیت شاخص‌ها $(\tilde{D} + \tilde{R})$ و روابط بین معیارها $(\tilde{D} - \tilde{R})$ اگر $\tilde{D} - \tilde{R} > 0$ باشد، معیار مربوطه اثرگذار و اگر $\tilde{D} - \tilde{R} < 0$ باشد معیار مربوطه اثرپذیر است.

گام هفتم: دی‌فازی‌کردن اعداد فازی $\tilde{D}_i + \tilde{R}_i$ و $\tilde{D}_i - \tilde{R}_i$ انجام می‌شود. در این رابطه، ماتریس دی‌فازی‌شده عدد $\tilde{A} = (a_1.a_2.a_3)$ است.

روش ANP و روش ترکیبی DANP فازی. مدل ANP حالت عمومی تحلیل سلسله‌مراتبی AHP است که در آن روابط فقط به‌صورت سلسله‌مراتبی تعریف نشده است و شبکه رسم‌شده دربرگیرنده روابط بیشتری است. در این روش نخست باید ساختار شبکه‌ای مسئله مدل‌سازی شود. برای این کار از روش دیمتل و ساختار به‌وجودآمده به‌وسیله این روش استفاده می‌شود. پس از ایجاد این شبکه در میان معیارهای اصلی مشخص می‌شود کدام معیارها بر یکدیگر تأثیرگذار بوده (روابط بیرونی) و زیرمعیارهای کدامیک از معیارها بر یکدیگر اثرگذار هستند (روابط درونی). در مرحله بعدی این روش باید به‌ازای تک‌تک روابط موجود در ساختار شبکه، مقایسات زوجی بین معیارها و زیرمعیارها صورت گیرد. این مقایسات، بر اساس پژوهش ساعتی (۱۹۷۰)، با ثابت‌کردن یک عامل میان سایر عوامل باید انجام گیرد که مشخصاً پیچیده و زمان‌گیر خواهد بود. همان‌طور که اشاره شد، برای جلوگیری از به‌وجودآمدن این موضوع چن[1] و همکاران (۲۰۱۱)، روش DANP را ارائه کردند. در این روش از ماتریس ارتباطات کامل به‌وجودآمده در روش دیمتل به‌عنوان سوپرماتریس مقایسات زوجی استفاده شده است. مراحل این روش به شرح زیر است:

گام نخست: ایجاد ساختار شبکه‌ای میان معیارها و محاسبه ماتریس ارتباطات کامل میان معیارها و زیرمعیارها با استفاده از دیمتل.

گام دوم: تشکیل سوپرماتریس وزن‌دارنشده از روی ماتریس ارتباطات کامل. این گام یک مرتبه به‌ازای ماتریس ارتباطات کامل میان معیارها و بار دیگر بر روی ماتریس ارتباطات کامل میان زیرمعیارها انجام می‌شود. اگر ماتریس ارتباطات کامل به‌دست‌آمده از روش دیمتل را T در نظر گرفته شود، برای به‌دست‌آوردن سوپرماتریس وزن‌دارنشده (T_c^a) باید نخست داده‌های موجود در هر بلاک مربوط به زیرمعیارهای یک معیار را نرمال کرد و ترانهاده ماتریس نهایی به‌دست‌آمده از کنارهم‌قراردادن بلاک‌ها را به‌عنوان سوپرماتریس وزن‌دارشده در نظر گرفت.

$$T=\begin{bmatrix} T^{11}\dots T^{1j}\dots T^{1m} \\ T^{J1}\dots T^{ji}\dots T^{im} \\ T^{m1}\dots T^{mj}\dots T^{mm} \end{bmatrix} T^{11}=\begin{bmatrix} T_{11}^{11}\dots T_{12}^{11}\dots T_{1m_2}^{11} \\ T_{21}^{11}\dots T_{22}^{11}\dots T_{2m_2}^{11} \\ T_{m1}^{11}1\dots T_{m_12}^{11}\dots T_{m_1m_2}^{11} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۴)}$$

با تقسیم عناصر هر سطر ماتریس، T^{ij} بر مجموع عناصر همان سطر و کنارهم‌قراردادن آن‌ها ماتریس نرمال‌شده T^a به دست می‌آید. سوپرماتریس وزن‌دارنشده عبارت است از: ترانهاده ماتریس به‌دست‌آمده در این مرحله:

1. Chen

$$T_c^a = (T^a)'$$ رابطه (۵)

گام سوم: تشکیل سوپرماتریس وزن‌دار: در این گام با استفاده از سوپرماتریس وزن‌دارنشده میان معیارهای اصلی عنصر مربوط به هر بلاک سوپرماتریس مربوط به زیرمعیارها در عناصر بلاک ضرب شده و سوپرماتریس وزن‌دار (W) تشکیل می‌شود.

گام چهارم: تعیین اولویت‌های نهایی: پس از تشکیل سوپرماتریس وزن‌دارشده با استفاده از حد بی‌نهایت ماتریس تشکیل‌شده، وزن‌های نهایی تعیین می‌شود.

$$\lim_{K\to\infty} W^K$$ رابطه (۶)

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

مرحله اول: شناسایی توانمندسازهای صنعت ۴ در مدیریت زنجیره تامین پایدار

برای دستیابی به چارچوب اولیه پژوهش بر پایه روش هفت‌مرحله‌ای فراترکیب سندوسکی و باروسو (۲۰۰۷)، هر یک از مراحل اجرایی آن بر اساس پژوهش‌های پیشین ارائه می‌شود. مرحله نخست فراترکیب مربوط به تنظیم سؤال‌های پژوهش است که باید علاوه بر علاقه‌مندی ادامه پژوهش‌های قبلی پژوهشگر باشد. سؤال‌های پژوهش باید دارای ویژگی‌هایی باشند که در جدول ۲، ارائه شده است.

جدول ۲. سؤال‌های پژوهش

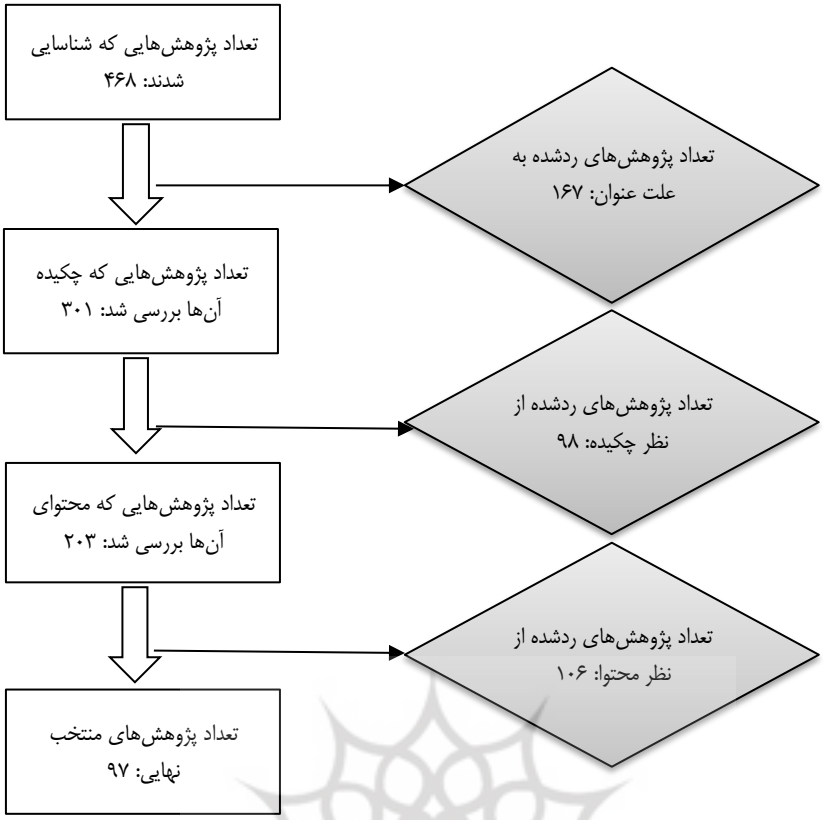
مؤلفه‌ها	سؤال‌های پژوهش
چیستی کار (What)	توانمندسازهای صنعت ۴.۰ مدیریت زنجیره تأمین پایدار چیست؟
جامعه موردمطالعه (Who)	مقاله‌های منتشرشده در پایگاه داده‌های داخلی و خارجی
بازه زمانی مطالعه (When)	۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ برای مطالعات داخلی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۲ برای مطالعات خارجی
چگونگی یا روش مطالعه (How)	بررسی موضوعی آثار، شناسایی و یادداشت‌برداری نکات کلیدی، تحلیل مفاهیم موردمطالعه، دسته‌بندی مفاهیم و مقوله‌ها

در بخش ابتدایی مرحله فراترکیب، به پرسش‌های کلی که در این زمینه مطرح شده، پاسخ داده شد تا از ابهام‌های بیشتر جلوگیری شود. بدین ترتیب، فقط آثاری باید در این مطالعه گنجانده شود که در آن‌ها بیشتر به مؤلفه‌ها و ابعاد مهم و تأثیرگذار بر مدل‌سازی توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار پرداخته شده است. بازه زمانی انتخاب‌شده بین

سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ شمسی و ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۲ میلادی است؛ زیرا در این سال‌ها صنعت ۴.۰ وارد صنایع شده و تأثیرگذاری خود را بیشتر از دهه پیش نشان داده است.

برای شروع دقیق و نظام‌مند مطالعات منابع اعم از مقاله‌ها، پایان‌نامه‌ها و پژوهش‌هایی که با هدف پژوهش و بازه زمانی مشخص‌شده متناسب هستند، انتخاب شده است. در مرحله بعد پژوهش‌هایی که واجد شرایط برای ورود به فراترکیب انتخاب شدند و معیارهای ورود و خروج بر اساس مطالعه تعیین شدند. معیارهای ورود و خروج از پژوهش شامل زبان مطالعه که فارسی و انگلیسی بوده، موضوع موردمطالعه توانمندسازهای صنعت ۴.۰ و مدیریت زنجیره تأمین پایدار بوده است. نوع مطالعه مقاله‌های علمی پژوهشی چاپ‌شده در مجله‌های معتبر بوده و سال پژوهش نیز بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۲ و ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ بوده است؛ ازاین‌رو جست‌وجوی نظام‌مند در پژوهش‌های منتشرشده در منابع مختلف صورت گرفت و کلیدواژه‌های مرتبط یافت شد و در پایگاه داده‌های داخلی اعم از بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran) و پایگاه مجلات تخصصی نور (Noormags) و پایگاه داده‌های خارجی اعم از ScienceDirect، Springer و Elsevier جست‌وجو و مقاله‌های علمی ـ پژوهشی که در مجله‌های معتبر چاپ شده بودند، انتخاب شد. برای مثال، مقاله‌های همایشی و مقاله‌هایی که در وبگاه‌های شخصی منتشر شده بودند، انتخاب نشد. از کلیدواژه‌های «توانمندسازهای صنعت ۴.۰»، نتوانمندسازهای زنجیره تأمین پایدار» و «توانمندسازهای زنجیره تأمین سبز» برای جست‌وجو در پایگاه داده‌های داخلی و از کلیدواژه‌های «Industry 4.0»، «I4.0»، «Digital Technologies»، «Enablers»،«Drivers»، «Success Factors»، «Supply Chain»، «Scm»، « Supply Chain Management»، «Sustain»، «OR»، «Green»، «Ecological»، «Environmental» استفاده شد.

در گام سوم، پژوهش‌های فراوانی با توجه به تعدد زیاد واژگان کلیدی استخراج شد که با توجه به پارامترهای مختلف مقاله‌هایی که هم‌راستا با پژوهش نبودند حذف شد. ابتدا منابع بر اساس عنوان مقایسه و تعداد زیادی از مقالات حذف شدند؛ سپس بر اساس چکیده، بررسی و تعدادی مقاله بی‌ربط حذف شدند و در انتها نیز بر اساس متن کامل مقاله، محتوای مقاله‌ها بررسی شد که در آنجا نیز تعدادی از مقاله‌ها حذف شدند؛ همچنین آخرین مقاله‌های فهرست‌شده به‌صورت جداگانه برای تعیین ارتباط آن‌ها با پژوهش حاضر موردمطالعه قرار گرفتند. توانمندسازهای صنعتی ۴.۰ که در این مطالعات موردبررسی قرار گرفتند، ابتدا در یک صفحه اکسل نقشه‌برداری شده و سپس توانمندسازهای تکراری حذف شدند تا اطمینان حاصل شود که فهرست نهایی تنها شامل توانمندسازهای منحصربه‌فرد است. خلاصه فرایند در شکل ۱، ارائه شده است.



شکل ۱. خلاصه‌ای از نتایج جست‌وجو و انتخاب مقاله‌های مناسب

شکل ۱، نشان می‌دهد که از ۴۶۸ مقاله یافت‌شده، ۱۶۷ مورد از نظر مقایسه عنوان، ۹۸ مورد از لحاظ بررسی چکیده و ۱۰۶ مورد از نظر بررسی متون و محتوای مقاله هم‌خوانی نداشتند که حذف شدند و تعداد ۹۷ مقاله تأیید شد که در زمینه توانمندسازهای صنعت ۴.۰ و زنجیره تأمین پایدار بودند که هم از نظر عنوان و هم از نظر محتوا هم‌راستا با این پژوهش بودند.

در گام چهارم استخراج اطلاعات از متون با توجه به اهداف و سؤال‌های پژوهش است. در این مرحله منابع منتخب و نهایی مجدداً به‌طور کامل مطالعه شده و شاخص‌های توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار از درون متن استخراج شد که درمجموع ۱۱۴ کُد شناسایی شد. در مرحله بعدی، کُدهایی که از متن منابع استخراج شده بودند (کدگذاری باز) و با درنظرگرفتن مفهوم هر یک، آن‌ها با یکدیگر مقایسه و در یک مفهوم مشابه با درنظرگرفتن وجه اشتراکشان دسته‌بندی شدند (کدگذاری محوری). درنهایت مفاهیم مشابه نیز به همین ترتیب تحت عنوان یک مقوله برچسب‌گذاری شدند (کدگذاری انتخابی). به‌این‌ترتیب کُدها، مفاهیم و

مقوله‌های پژوهش مشخص شدند. کدگذاری‌های انتخابی، محوری و کدهای باز در جدول ۳، نشان داده شده است.

جدول ۳. کدگذاری‌های انتخابی، محوری و کُدهای باز

کُد انتخابی	کُد محوری	کُد اولیه	منابع
عوامل سازمانی (A)	استراتژی سازمان (A1)	اتخاذ سیستم‌های طراحی و دفع سبز، سیاست‌های پاداش و تشویق برای پذیرش پایداری، اتخاذ سیستم منابع انرژی پایدار، نظارت مستمر بر کاهش آلودگی محیط‌زیست، افزایش حداقل دستمزدها، حفاظت از قیمت	[۹۵، ۶۷، ۶۱، ۷۸، ۵۵، ۲۴، ۴۰، ۲۹، ۱۹، ۱۷، ۶۵، ۷۸، ۷]
	یکپارچگی داخلی و خارجی (A2)	ادغام افقی در شبکه‌های ارزش کسب‌وکار، همکاری با تأمین‌کنندگان، یکپارچه‌سازی داده‌ها در تمام مراحل چرخه عمر محصول	[۷۸، ۳۶، ۳۷، ۹۸، ۱۰۱، ۸۶]
	تخصص و آگاهی کارکنان در خصوص صنعت ۴.۰ (A3)	آموزش کارکنان موجود، استخدام کارکنان متخصص، تقویت تعامل انسان و ماشین و مواد، کنترل نگرش کارگران و مقاومت آن‌ها در برابر اجرای صنعت ۴.۰، رسیدگی به نگرانی و اضطراب کارکنان به‌وسیله سازمان، پذیرش تغییرات به‌وسیله کارکنان، پذیرش سیستم یادگیری ماشینی، فرصت‌های شغلی متعدد	[۴۶]. [۷۷، ۴۰، ۵۰، ۷۶، ۶۵، ۷۳، ۳۲، ۹۸، ۲۸]
	سازوکار نظارتی، حقوقی و قراردادی (A4)	مسائل حقوقی و قراردادی، مسائل حقوقی یا نظارتی، سازوکار نظارتی، قطعیت حقوقی و قراردادی، مسائل حقوقی صنعت	[۴۳، ۴۲، ۶۲، ۶۳، ۴۱]
	تعهد مدیران ارشد نسبت به اجرای صنعت ۴.۰ (A5)	مشارکت و تعهد قوی نسبت به پذیرش پایداری در مدیران، آگاهی، درک و بینش نسبت به پایداری، آگاهی از زنجیره تأمین پایدار، دانش و مهارت مدیران برای اجرای اقدامات پایداری، آگاهی از مزایای صنعت۴.۰ و زنجیره تأمین پایدار	[۴۳، ۸۵، ۶۳، ۶۲، ۹۵، ۷۸]
سیستم تولید (B)	تجهیزات و امکانات تولید (B1)	استقلال ماشین‌آلات از مداخله انسانی، استفاده از ماشین‌آلات جدید با آلایندگی کمتر، سازگاری ماشین‌آلات موجود، انعطاف‌پذیری تولید، سیستم‌های اشتراک‌گذاری اطلاعات پیشرفته، تصویب قوانین بهداشت و ایمنی	[۵۴، ۱۱، ۹۸، ۷۸، ۴۶، ۹۷، ۲۸، ۹]
	مدیریت ریسک و ایمنی (B2)	پوشیدنی‌های ایمنی هوشمند، دوربین‌های هوشمند، حسگرهای هوشمند	[۳۰]
	سیستم تولید مواد افزودنی (B3)	قابلیت کنترل فرآیند بهبودیافته، بهره‌وری مواد/ منابع/ انرژی، هزینه‌های منابع انسانی کاهش‌یافته، فرآیندهای تدارکات ساده، خطاهای انسانی کمتر، پیشگیری از حادثه، نظارت بلادرنگ	[۳۰، ۳۴، ۱۶، ۱۷، ۲۱، ۲۴، ۷۸، ۷۵، ۵۳]

کُد انتخابی	کُد محوری	کُد اولیه	منابع
	انطباق استانداردها (B4)	یکپارچگی استانداردها برای تبادل اطلاعات، استانداردسازی فرآیند تولید، ایجاد استانداردهای مطلوب، همسویی با پایداری	[۳۰، ۹۵، ۱۶، ۵۶، ۸۲، ۸، ۴۳، ۸۶، ۱]
محیط‌زیست (C)	همزیستی صنعتی (C1)	تأمین‌کنندگان مواد اولیه، مراکز دفع ضایعات بلااستفاده، کارخانه مبدأ و ارائه‌دهنده ضایعات خروجی به شبکه، مراکز بالقوه بازیابی، فاصله تأمین‌کننده با مصرف‌کننده، فاصله بازیابی با مصرف‌کننده	[۴]
	بازیافت مواد (C2)	کاهش مقدار کل زباله و ضایعات، تولید مجدد و بازیافت‌شده، افزایش سهم مواد استفاده مجدد	[۷۸، ۲۸، ۳۲]
	کاهش اثرات زیست‌محیطی (C3)	انتشار گازهای گلخانه‌ای، مقدار آب مورداستفاده، انتشارات سروصدا، کاهش حوادث زیست‌محیطی	[۲۸، ۷۸]
	پایداری انرژی (C4)	مصرف انرژی اولیه، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، بهره‌وری انرژی	[۲۸، ۷۸]
محصول (D)	چرخه عمر محصول (D1)	کسب مواد خام، توسعه محصول، مونتاژ یا تدارکات، خدمات یا نگهداری، استفاده مجدد، بازسازی یا بازیافت	[۷۸]
	نوآوری محصول و خدمات (D2)	نوآوری‌های مستمر در محصولات و خدمات، کیفیت برتر محصول و خدمات، اصلاح سریع محصول، تولید انعطاف‌پذیر از محصولات	[۱]، [۴۴، ۹۴، ۲۶، ۷، ۳۵]
	دانش محصول (D3)	حرفه‌ای‌گری، دانش و کیفیت محصولات و خدمات	[۸۳، ۶۱، ۴۱]
اقتصادی (E)	پشتیبانی مالی (E1)	کنترل و پشتیبانی مالی، پشتیبانی مالی از خرابی ماشین‌آلات	[۱۴، ۶۳، ۶۷، ۷۱، ۹۰، ۳۸، ۴، ۳۵، ۲۵]
	درآمد (E2)	سود، تقسیم درآمد، بهره‌وری	[۸۷، ۴۶، ۴۵].
	کاهش هزینه‌های سازمان (E3)	کاهش هزینه لجستیک، کاهش هزینه‌های موجودی، کاهش زمان چرخه، کاهش هزینه‌های نیروی کار	[۶۳، ۵۵، ۵۷، ۳۶، ۸۸، ۵۶، ۴۵]
	بودجه و ابزارهای مالی برای آموزش و تحقیق و توسعه (E4)	بودجه حمایتی سرمایه‌گذاری، نوآوری و پژوهش در مورد پایداری، بودجه برای آموزش، بودجه برای تحقیق و توسعه	[۹۳، ۶۶، ۶۱، ۸۰، ۳۱، ۴۰، ۵۸]
	سرمایه‌گذاری اولیه (E5)	نیاز به سرمایه‌گذاری بلندمدت، هزینه‌های سرمایه‌گذاری در زیرساخت اینترنت اشیا، سرمایه‌گذاری در پیاده‌سازی صنعت ۴.۰، سرمایه‌گذاری اولیه در زیرساخت	[۴۲، ۳۹، ۸۳، ۹۱]
فنّاوری (F)	زیرساخت فناورانه (F1)	زیرساخت‌های فناوری اطلاعات پیشرفته، وجود سیگنال قوی و طیف پهن باند وسیع (اینترنت پرسرعت)، امکانات فناوری اطلاعات، وجود زیرساخت‌های اساسی فیزیکی و	[۳۹، ۴۱، ۹۱، ۸۳، ۶۱، ۴۲، ۴۹]

کُد انتخابی	کُد محوری	کُد اولیه	منابع
		دیجیتالی فناوری اطلاعات برای خدمات داده‌های داده	
	امنیت سایبری (F2)	شناسایی روش‌ها و دستگاه‌ها و تشخیص تهدیدها، روش‌های انتقال ایمن حجم بزرگ داده‌های بین‌شبکه‌ای، ایمن‌سازی محصول و داده‌های اعضای زنجیره تأمین، ارائه راهکار برای خرابی سیستم‌های میان‌مدت تا بلندمدت ناشی از ضعف امنیت IT، اولویت‌بندی ریسک، ارزیابی اولیه برای شناسایی خطر بالقوه، امنیت اطلاعات، شفافیت اطلاعات	[۸، ۳۷، ۴، ۶، ۳، ۶۹، ۹۴، ۲۶]
	ادغام فنّاوری و سیستم تولید (F3)	حسگرها و سیستم‌های اکتساب داده، ادغام عناصر دیجیتال و فیزیکی، انتخاب بهترین فناوری‌های مناسب با شرایط کارخانه، اکتساب بی‌درنگ داده‌های عملیاتی در چرخه عمر محصولات و جریان مواد، تعداد بیشتری از حسگرها و پردازشگرهای یکپارچه‌شده در سیستم تولید	[۷، ۴، ۵]
اجتماعی (G)	تعاملات و همکاری سازمان (G1)	همکاری، بازارهای محلی، توسعه جامعه، توسعه جوانان	[۶۳، ۷۲، ۵۰، ۵۵، ۵۷، ۴۶، ۴۵]
	مسئولیت اجتماعی (G2)	عوامل تنظیم‌کننده اجتماعی، مسئولیت اجتماعی شرکت، تعاملات غیرتهاجمی، ارگونومی و ایمنی بهبودیافته	[۵۳، ۵۴، ۵۹، ۵۵، ۴۶، ۸۸]

درکل ۴۶۸ مقاله پژوهشی شناسایی شد که در مورد صنعت ۴.۰ و پایداری زنجیره تأمین بودند؛ اما تنها ۹۷ مورد از ۴۶۸ مقاله، صنعت ۴.۰، توانمندسازی صنعت ۴.۰، زنجیره تأمین، پایداری، توانمندسازی زنجیره تأمین و دیگر کلیدواژه‌های موردنظر را موردبحث قرار داده بودند؛ به این معنا که دامنه وسیعی از کار پژوهشی در این رابطه وجود دارد. از بررسی مقاله‌ها ۱۱۴ کُد باز شناسایی شد که این کُدها با توجه به مبانی نظری پژوهش و شهود پژوهشگر در ۲۶ کُد محوری مقوله‌بندی شدند و در انتها این ۲۶ کُد محوری در ۷ کُد انتخابی جایگذاری شد.

مرحله دوم: تعیین تأثیرگذاری و تأثیرپذیری و اولویت‌بندی توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار

بخش اول: مشخصات دموگرافیگ. نمونه آماری در بخش کمّی پژوهش شامل ۱۲ نفر از خبرگان این حوزه که حداقل ۱۰ سال سابقه اجرایی داشته‌اند، با روش هدفمند ـ قضاوتی انتخاب شد و پرسشنامه مقایسه زوجی به‌صورت فردی انجام پذیرفت. ازآنجاکه این هدف این پژوهش ادغام روش‌های سنتی با روش‌های مدرن می‌باشد؛ بنابراین خبرگانی انتخاب شدند که تحصیل‌کرده بوده و فرم سازمانی آن‌ها به‌صورت سنتی نبود؛ بلکه از ماشین‌آلات مدرن و جدید در صنعت کاشی‌کاری استفاده می‌کردند.

جدول ۴. مشخصات دموگرافیک خبرگان

خبرگان	سن	تحصیلات	سابقه
اول	۳۶	کارشناسی ارشد	۱۱
دوم	۵۵	کارشناسی	۲۱
سوم	۴۳	کارشناسی ارشد	۱۵
چهارم	۳۹	کارشناسی ارشد	۱۳
پنجم	۳۵	دکتری	۱۲
ششم	۴۹	کارشناسی ارشد	۲۰
هفتم	۴۴	کارشناسی	۱۴
هشتم	۳۸	کارشناسی ارشد	۱۰
نهم	۴۰	دکتری	۱۴
دهم	۵۸	کارشناسی ارشد	۲۵
یازدهم	۵۶	کارشناسی	۲۲
دوازدهم	۴۰	کارشناسی ارشد	۱۴

بخش دوم: تجزیه‌وتحلیل دیمتل فازی. در این پژوهش برای تعیین میزان تأثیرگذاری یا تأثیرپذیری و میزان اهمیت توانمندسازها از تکنیک ترکیبی ANP– DEMATEL فازی استفاده شد. با توجه به فرآیند انجام این تکنیک که در بخش‌های گذشته تشریح شد، در ابتدا ماتریس‌های اولیه تکمیل‌شده در اختیار ۱۲ نفر از خبرگان قرار گرفت و از آنان درخواست شد که با مقایسه زوجی ابعاد و چالش‌های هر بُعد با دیگر ابعاد، شدت تأثیر عامل سطری بر عوامل ستونی را به‌صورت عددی بین صفر تا ۴ در خانه‌های مربوط به آن‌ها درج کنند؛ سپس مطابق با جدول ۱، این اعداد، به اعداد فازی مثلثی تبدیل شدند. در مرحله بعد، پس از جمع‌بندی و محاسبه میانگین حسابی نظرهای خبرگان و نرمال‌سازی ماتریس اولیه روابط مستقیم فازی، ماتریس روابط مستقیم فازی نرمال‌شده حاصل شد.

در مقایسه زوجی در روش دیمتل فازی ابتدا کُدهای انتخابی (ابعاد اصلی) مقایسه شد و سپس هر دسته از کُدهای انتخابی به‌صورت مجزا (کُدهای محوری زیرمجموعه هر دسته) مقایسه شدند. درواقع ابتدا روابط بین ابعاد اصلی که همان کُدهای انتخابی بودند، تعیین شد و سپس در سطحی دیگر روابطی که کُدهای محوری در هر دسته با یکدیگر داشتند، تعیین شد.

پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۵. ماتریس نرمال فازی (شدت روابط مستقیم) برای ابعاد

ابعاد	D	C	B	A
A	(۰.۰۷، ۰.۰۵، ۰.۰۳)	(۰.۰۵، ۰.۰۴، ۰.۰۲)	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	(۰، ۰، ۰)
B	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	(۰، ۰، ۰)	(۰، ۰، ۰.۱)
C	(۰.۰۶، ۰.۰۴، ۰.۰۲)	(۰، ۰، ۰)	(۰.۰۵، ۰.۰۳، ۰.۰۱)	(۰، ۰، ۰.۱)
D	(۰، ۰، ۰)	(۰.۰۷، ۰.۰۵، ۰.۰۳)	(۰.۰۶، ۰.۰۴، ۰.۰۲)	(۰، ۰، ۰.۱)
E	(۰.۰۷، ۰.۰۵، ۰.۰۳)	(۰، ۰، ۰.۱)	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)
F	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	(۰.۰۵۷، ۰.۰۳۹، ۰.۰۲۱)
G	(۰، ۰، ۰.۱)	(۰.۰۶، ۰.۰۴، ۰.۰۲)	(۰.۰۵، ۰.۰۳، ۰.۰۱)	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)
ابعاد	E	F	G	
A	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	(۰.۰۵، ۰.۰۳، ۰.۰۱)	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	
B	(۰.۰۷، ۰.۰۶، ۰.۰۴)	(۰، ۰، ۰.۱)	(۰، ۰، ۰.۱)	
C	(۰.۰۶، ۰.۰۴، ۰.۰۲)	(۰.۰۶، ۰.۰۴، ۰.۰۲)	(۰.۰۶، ۰.۰۴، ۰.۰۲)	
D	(۰.۰۷، ۰.۰۵، ۰.۰۳)	(۰، ۰، ۰.۱)	(۰، ۰، ۰.۱)	
E	(۰، ۰، ۰)	(۰/۰۷، ۰/۰۶۹، ۰/۰۵)	(۰.۰۷، ۰.۰۶۲، ۰.۰۴)	
F	(۰/۰۷، ۰/۰۵۹، ۰/۰۴)	(۰، ۰، ۰)	(۰.۰۷، ۰.۰۵۷، ۰.۰۳)	
G	(۰/۰۵، ۰/۰۳۹۳، ۰/۰۲)	(۰، ۰، ۰.۱)	(۰، ۰، ۰)	

بعد از نرمال‌سازی نظر خبرگان در رابطه با ابعاد، ماتریس T طبق روابط مرحله چهارم تکنیک دیمتل فازی برای هر کدام از حدهای فازی (L، M، U) محاسبه و درنهایت با ترکیب سه ماتریس، ماتریس روابط مجموع نهایی T در قالب جدول ۶ به‌دست آمد.

جدول ۶. ماتریس T فازی

ابعاد	D	C	B	A
A	(۰/۱۰، ۰/۰۷، ۰/۰۴)	(۰/۰۸، ۰/۰۵، ۰/۰۲)	(۰/۱۰، ۰/۰۷، ۰/۰۴)	(۰/۰۲، ۰/۰۱، ۰/۰۰۴)
B	(۰/۰۹، ۰/۰۷، ۰/۰۴)	(۰/۰۸، ۰/۰۷، ۰/۰۴)	(۰/۰۲، ۰/۰۱، ۰/۰۰)	(۰/۰۳، ۰/۰۰، ۰/۰۰۲)
C	(۰/۰۸، ۰/۰۵، ۰/۰۳)	(۰/۰۲، ۰/۰۱، ۰/۰۰)	(۰/۰۸، ۰/۰۴، ۰/۰۲)	(۰/۰۳، ۰/۰۰، ۰/۰۰۳)
D	(۰/۰۲، ۰/۰۱، ۰/۰۰)	(۰/۰۸، ۰/۰۵، ۰/۰۳)	(۰/۰۸، ۰/۰۵، ۰/۰۲)	(۰/۰۳، ۰/۰۰، ۰/۰۰۱)
E	(۰/۱۰، ۰/۰۷، ۰/۰۴)	(۰/۰۵، ۰/۰۲، ۰/۰۰)	(۰/۱۰، ۰/۰۷، ۰/۰۵)	(۰/۰۹، ۰/۰۷، ۰/۰۴۷)
F	(۰/۱۰، ۰/۰۷، ۰/۰۵)	(۰/۱۰، ۰/۰۸، ۰/۰۵)	(۰/۱۰، ۰/۰۷، ۰/۰۴)	(۰/۰۷، ۰/۰۴، ۰/۰۲)
G	(۰/۰۴، ۰/۰۱، ۰/۰۰)	(۰/۰۸۱، ۰/۰۵۱، ۰/۰۲)	(۰/۰۷، ۰/۰۴۸، ۰/۰۲۳)	(۰/۰۸، ۰/۰۶، ۰/۰۴۵)
ابعاد	G	F	E	
A	(۰/۰۹، ۰/۰۷، ۰/۰۵)	(۰/۰۷، ۰/۰۴، ۰/۰۲)	(۰/۱۰، ۰/۰۷، ۰/۰۴)	
B	(۰/۰۳، ۰/۰۰، ۰/۰۰)	(۰/۰۳، ۰/۰۰، ۰/۰۰)	(۰/۰۹، ۰/۰۶، ۰/۰۴)	
C	(۰/۰۸، ۰/۰۵، ۰/۰۳)	(۰/۰۷، ۰/۰۵، ۰/۰۲)	(۰/۰۸، ۰/۰۵، ۰/۰۳)	
D	(۰/۰۳، ۰/۰۰، ۰/۰۰)	(۰/۰۳، ۰/۰۰، ۰/۰۰)	(۰/۰۹، ۰/۰۶، ۰/۰۴)	
E	(۰/۰۹، ۰/۰۷، ۰/۰۴)	(۰/۰۸، ۰/۰۷، ۰/۰۵)	(۰/۰۳، ۰/۰۲، ۰/۰۰)	
F	(۰/۰۹، ۰/۰، ۰/۰۴۴)	(۰/۰۲۴، ۰/۰۱۰، ۰/۰۰۴)	(۰/۱۰۷، ۰/۰۷۸، ۰/۰۴۸)	
G	(۰/۰۲، ۰/۰۱، ۰/۰۰۴)	(۰/۰۳۶، ۰/۰۰۸۳، ۰/۰۰۲)	(۰/۰۸۱، ۰/۰۵۰۲، ۰/۰۲۵)	

جدول ۷، ماتریس T فازی کُدهای انتخابی فازی‌زدایی شده است.

جدول ۷. ماتریس فازی‌زدایی‌شده

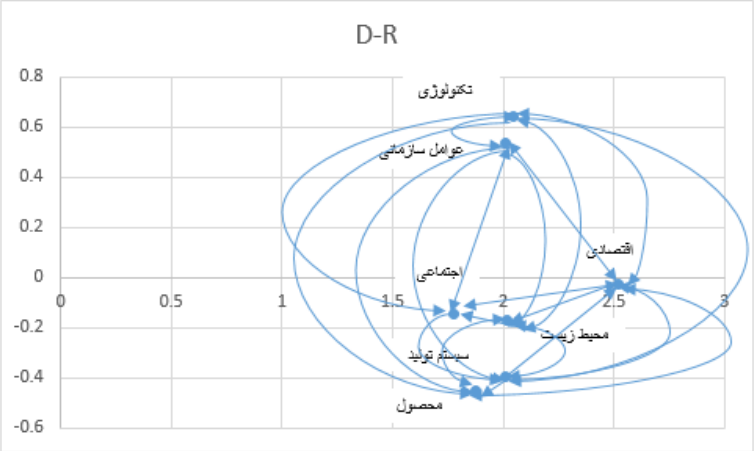
	عوامل سازمانی	سیستم تولید	محیط‌زیست	محصول	اقتصادی	فناوری	اجتماعی
عوامل سازمانی	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۰۴
سیستم تولید	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۰۴	۰/۰۴
محیط‌زیست	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۰۵
محصول	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۰۳
اقتصادی	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۰۸	۰/۲۳	۰/۲۱
فناوری	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۱۵
اجتماعی	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۹

در ادامه، D (جمع سطرها) و R (جمع ستون‌ها) محاسبه و با توجه به روش مرکز ناحیه از حالت فازی خارج شدند. نتیجه به همراه D+R و D-R در جدول ۸، مشاهده می‌شود.

جدول ۸. محاسبات D و R کد انتخابی

متغیر	D-R	D+R	R	D
عوامل سازمانی	۰/۵۳۹۵۲۱	۲/۰۱۰۱۸	۰/۷۳۵۳۲۹۵۳۵	۱/۲۷۴۸۵
سیستم تولید	-۰/۳۹۲۴۹	۲/۰۱۱۱۷	۱/۲۰۱۸۲۷۶۸۴	۰/۸۰۹۳۴۲
محیط‌زیست	-۰/۱۶۷۱	۲/۰۱۹۹۹۱	۱/۰۹۳۵۴۵۱۴۸	۰/۹۲۶۴۴۶
محصول	-۰/۴۴۹۲۷	۱/۸۷۴۱۲۷	۱/۱۶۱۶۹۹۳۸۸	۰/۷۱۲۴۲۷
اقتصادی	-۰/۰۲۷۲	۲/۵۲۲۹۴	۱/۲۷۵۰۷۰۷۷۶	۱/۲۴۷۸۶۹
فناوری	۰/۶۴۰۹۷۴	۲/۰۴۵۰۰۸	۰/۷۰۲۰۱۶۹۷۷	۱/۳۴۲۹۹۱
اجتماعی	-۰/۱۴۴۴۴	۱/۷۷۴۳۴۸	۰/۹۵۹۳۹۱۴۲۱	۰/۸۱۴۹۵۶

به استناد برآیند نظر خبرگان در ارتباط میان ابعاد توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار و داده‌های جدول ۸، نمودار علت و معلولی به‌صورت شکل ۲، ترسیم شد. در جدول ۸، درجه تأثیرگذاری و تأثیرپذیری هر یک از ابعاد به‌دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مؤلفه‌های اقتصادی، سازمانی و فناوری تأثیرگذارترین و مؤلفه‌های محصول و محیط‌زیست تأثیرپذیرترین توانمندها در صنعت ۴.۰ محسوب می‌شوند.



شکل ۲. روابط علت و معلولی ابعاد توانمندسازهای صنعت ۴.۰

به همین ترتیب، تمامی دسته‌های کُدهای انتخابی به‌صورت مجزا بررسی شد و مقایسه زوجی در هر دسته به‌صورت مجزا صورت گرفت. عوامل تأثیرگذار و تأثیرپذیر در هر دسته مشخص شد و مقادیر D، R و D+R و D-R برای توانمندسازهای هر بُعد محاسبه شد که در جدول ۹، مشاهده می‌شود (ماتریس T فازی‌زدایی‌شده برای هر کُد انتخابی به تفکیک در ضمیمه پژوهش آورده شده است).

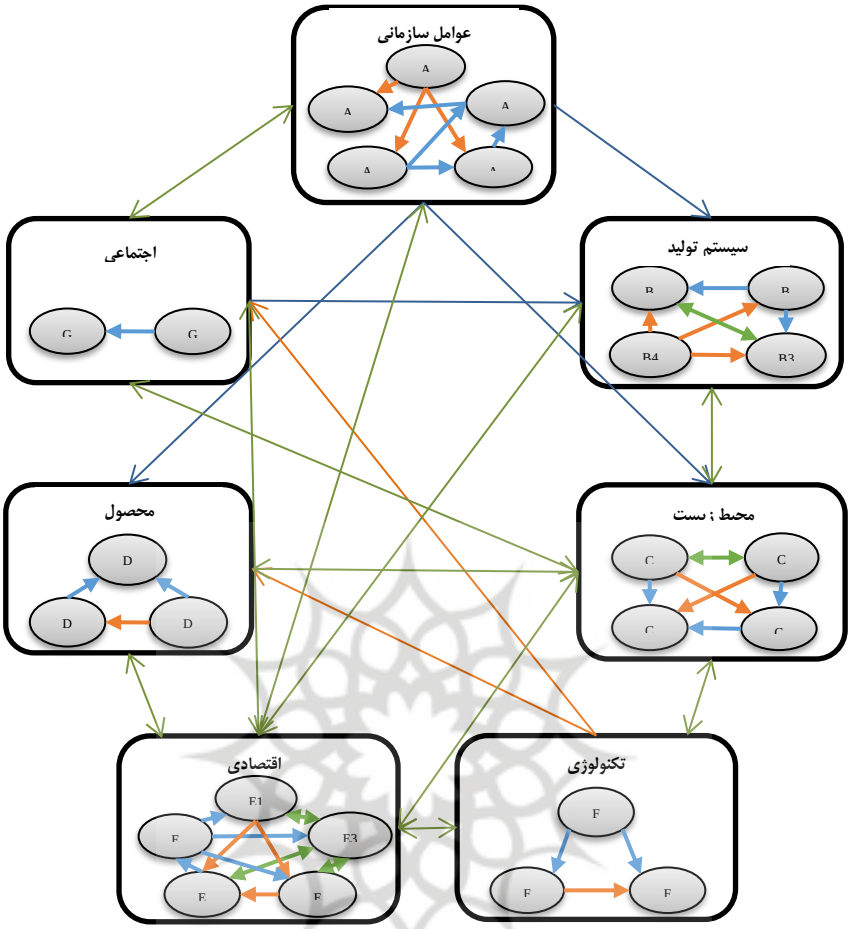
جدول ۹. محاسبات D و R کُد محوری

کُد انتخابی	علامت اختصاری	کُد محوری	علامت اختصاری	D	R	D+R	D-R
عوامل سازمانی	A	استراتژی سازمان	A۱	۱/۱۰۵	۰/۱۳۱	۱/۲۳۶	۰/۹۷۴
		یکپارچگی داخلی و خارجی	A۲	۰/۱۲۶	۰/۵۷۷	۰/۷۰۴	-۰/۴۵۱
		تخصص و آگاهی کارکنان در خصوص صنعت ۴.۰	A۳	۰/۳۱۹	۰/۷۴۶	۱/۰۶۵	-۰/۴۲۷
		سازوکار نظارتی، حقوقی و قراردادی	A٤	۰/۳۶۹	۰/۴۸۴	۰/۸۵۳	-۰/۱۱۴
		تعهد مدیران ارشد نسبت به اجرای صنعت ۴.۰	A٥	۰/۳۷۴	۰/۳۵۵	۰/۷۲۹	۰/۰۱۹

کُد انتخابی	علامت اختصاری	کُد محوری	علامت اختصاری	D	R	D+R	D-R
سیستم تولید	B	تجهیزات و امکانات تولید	B۱	۰/۴۸۲	۱/۱۹۴	۱/۶۷۷	-۰/۷۱۱
		مدیریت ریسک و ایمنی	B۲	۰/۸۰۹	۰/۴۴۲	۱/۲۵۲	۰/۳۶۷
		سیستم تولید مواد افزودنی	B۳	۰/۴۷۷	۱/۲۰۵	۱/۶۸۳	-۰/۷۲۸
		انطباق استانداردها	B٤	۱/۲۰۵	۰/۱۳۲	۱/۳۳۸	۱/۰۷۲
محیط‌زیست	C	همزیستی صنعتی	C۱	۱/۱۹۵	۰/۵۰۱	۱/۶۹۶	۰/۶۹۳
		بازیافت مواد	C۲	۱/۲۰۷	۰/۴۵۶	۱/۶۶۴	۰/۷۵۱
		کاهش اثرات زیست‌محیطی	C۳	۰/۱۳۳	۱/۲۱۱	۱/۳۴۴	-۱/۰۷۷
		پایداری انرژی	C٤	۰/۴۵۴	۰/۸۲۲	۱/۲۷۶	-۰/۳۶۷
محصول	D	چرخه عمر محصول	D۱	۰/۱۳۳	۱/۱۴۳	۱/۲۷۷	-۱/۰۱۰
		نوآوری محصول و خدمات	D۲	۰/۵۹۶	۰/۵۸۰	۱/۱۷۷	۰/۰۱۶
		دانش محصول	D۳	۱/۱۲۷	۰/۱۳۳	۱/۲۶۱	۰/۹۹۴
اقتصادی	E	پشتیبانی مالی	E	۱/۰۷۸	۰/۶۲۰	۱/۶۹۸	۰/۴۵۸
		درآمد	E۲	۱/۲۵۷	۰/۱۶۲	۱/۴۱۹	۱/۰۹۵
		کاهش هزینه‌های سازمان	E۳	۰/۶۶۰	۱/۵۲۰	۱/۹۱۱	-۰/۵۸۹
		بودجه و ابزارهای مالی برای آموزش و تحقیق و توسعه	E٤	۰/۴۷۰	۱/۰۹۲	۱/۵۶۳	-۰/۶۲۲
		سرمایه‌گذاری اولیه	E٥	۰/۵۹۴	۰/۹۳۵	۱/۵۲۹	-۰/۳۴۱
فناوری	F	زیرساخت فناورانه	F۱	۱/۱۴۵	۰/۲۱۱	۱/۳۵۷	۰/۹۳۳
		امنیت سایبری	F۲	۰/۶۲۰	۰/۶۲۰	۱/۲۴۱	۰
		ادغام فناوری و سیستم تولید	F۳	۰/۲۱۱	۱/۱۴۵	۱/۳۵۷	-۰/۹۳۳
اجتماعی	G	تعاملات و همکاری سازمان	G۱	۰/۱۳۹	۱/۰۵۳	۱/۱۹۳	-۰/۹۱۴
		مسئولیت اجتماعی	G۲	۱/۰۵۳	۰/۱۳۹	۱/۱۹۳	۰/۹۱۴

پس از تعیین رابطه در سطح کدهای انتخابی و همچنین زیرمؤلفه هر دسته از کُدهای انتخابی ابتدا به‌صورت کلی روابط میان کُدهای انتخابی مشخص شد؛ سپس به‌صورت جزئی

روابط میان زیرمؤلفه‌های کدهای انتخابی تعیین شد. الگوی روابط بین توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار را می‌توان در شکل ۴، مشاهده کرد.



شکل ۴. الگوی روابط بین توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار

در ادامه طبق روابط مطرح‌شده، سوپرماتریس وزن‌دارنشده ابعاد و همچنین توانمندسازهای ایجادشده و با ضرب عناصر مربوط به وزن هر بلاک از روی سوپرماتریس ابعاد، سوپرماتریس وزن‌دار شده به‌دست می‌آید؛ سپس باید این سوپرماتریس را به توان بی‌نهایت رساند. به‌منظور محاسبه حد بی‌نهایت، ماتریس وزن‌دارشده آنقدر به توان رسانده می‌شود تا با ۲ رقم اعشار همگرا شود. در این حالت عناصر یک سطر با یکدیگر برابر می‌شود و عدد به‌دست‌آمده وزن نهایی زیرمعیار را مشخص می‌کند. نتایج را می‌توان در جدول ۱۰، مشاهده کرد.

جدول ۱۰. نتایج رتبه‌بندی توانمندسازها با استفاده از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

کُد انتخابی	وزن	کُد محوری	وزن نسبی	وزن نهایی	رتبه
عوامل سازمانی	۰/۲۳۸	استراتژی سازمان	۰/۱۲۰	۰/۰۲۸۸	۱۹
		یکپارچگی داخلی و خارجی	۰/۲۷۶	۰/۰۶۶۰	۳
		تخصص و آگاهی کارکنان در خصوص صنعت ۴.۰	۰/۲۹۴	۰/۰۷۰۱	۱
		سازوکار نظارتی، حقوقی و قراردادی	۰/۱۷۵	۰/۰۴۱۸	۱۰
		تعهد مدیران ارشد نسبت به اجرای صنعت ۴.۰	۰/۱۳۲	۰/۰۳۱۵	۱۵
سیستم تولید	۰/۱۵۶	تجهیزات و امکانات تولید	۰/۴۰۸	۰/۰۶۳	۵
		مدیریت ریسک و ایمنی	۰/۰۹۴	۰/۰۱۴۸	۲۴
		سیستم تولید مواد افزودنی	۰/۴۲۴	۰/۰۶۶۳	۲
		انطباق استانداردها	۰/۰۷۲	۰/۰۱۱۲	۲۵
محیط‌زیست	۰/۱۶۳	همزیستی صنعتی	۰/۲۰۰	۰/۰۳۲۷	۱۴
		بازیافت مواد	۰/۱۸۹	۰/۰۳۱۰	۱۶
		کاهش اثرات زیست‌محیطی	۰/۳۶۲	۰/۰۵۹۳	۷
		پایداری انرژی	۰/۲۴۶	۰/۰۴۰۳	۱۲
محصول	۰/۱۲۹	چرخه عمر محصول	۰/۴۶۲	۰/۰۵۹۶	۶
		نوآوری محصول و خدمات	۰/۳۱۶	۰/۰۴۰۸	۱۱
		دانش محصول	۰/۲۲۰	۰/۰۲۸۵	۱۸
اقتصادی	۰/۱۰۷	پشتیبانی مالی	۰/۱۵۰۲	۰/۰۱۶۰	۲۳
		درآمد	۰/۰۵۵	۰/۰۰۵۹	۲۶
		کاهش هزینه‌های سازمان	۰/۳۴۸	۰/۰۳۷۳	۱۳
		بودجه و ابزارهای مالی برای آموزش و تحقیق و توسعه	۰/۲۴۳	۰/۰۲۶۱	۲۰
		سرمایه‌گذاری اولیه	۰/۲۰۱	۰/۰۲۱۶	۲۲
فنّاوری	۰/۰۹۳	زیرساخت فناورانه	۰/۲۴۶	۰/۰۲۳۰	۲۱
		امنیت سایبری	۰/۳۰۴	۰/۰۲۸۵	۱۷
		ادغام فناوری و سیستم تولید	۰/۴۴۸	۰/۰۴۱۹	۹
اجتماعی	۰/۱۱۱	تعاملات و همکاری سازمان	۰/۵۷۰	۰/۰۶۳۷	۴
		مسئولیت اجتماعی	۰/۴۲۹	۰/۰۴۷۹	۸

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف پژوهش حاضر شناسایی و ارائه مدلی برای توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار برای صنایع تولیدی در استان یزد بود. در این پژوهش برای شناسایی

مؤلفه‌های مؤثر با استفاده از روش فراترکیب، مقاله‌های داخلی و خارجی مرتبط با موضوع پژوهش بررسی شد که ۱۱۴ کُد باز، ۲۶ کُد محوری و درنهایت ۷ کُد انتخابی استخراج شد؛ سپس این کُدها به‌صورت پرسشنامه مقایسه زوجی در اختیار حوزه صنایع تولیدی کاشی در استان یزد که حداقل ۱۰ سال سابقه کار داشتند، قرار گرفت و اطلاعات به‌دست‌آمده از پرسشنامه و تحلیل آن با استفاده از روش ترکیبی دیمتل ـ فرایند تحلیل شبکه‌ای فازی ، روابط و اهمیت این توانمندسازها را نشان داد. در بررسی پژوهش‌های پیشین، شیواجی و همکاران (۲۰۱۹)، نشان دادند که فرآیندهای تولید با استفاده از دیجیتال‌سازی فرآیند و ابزارهای کنترل کیفیت، کارآمد و پایدار می‌شوند. آن‌ها بیشتر بر بهبود فرایند تولید به‌وسیله دیجیتالی‌سازی فرایندها تمرکز کردند و به ابعاد دیگر توجه نکردند. بییر و همکاران (۲۰۲۰)، بیان کردند که صنعت ۴.۰ ساختاری «اجتماعی ـ فنی» است که در آن چشم‌انداز فناورانه، اجتماعی و سازمانی در تعامل است و برای صرفه‌جویی در انرژی، زنجیره تأمین را به سمت پایداری سوق داد [۲۳]. پیاتاناوونگ و همکاران (۲۰۱۹)، مشاهده کردند که دانش، سرمایه‌گذاری و آموزش مفاهیم پایداری، الزامات حیاتی برای اجرای اقدامات پایدار در سازمان‌های تولیدی تایلند مؤثر هستند [۴۳]. تاکور و مانگلا (۲۰۱۹)، اظهار داشتند که متخصصان کشورهای درحال‌توسعه باید بر جنبه‌های انسانی، عملیاتی و فناورانه زنجیره‌های تأمین پایدار در سازمان‌های تولیدی لوازم‌خانگی تأکید کنند [۱۲]. در پژوهش‌های داخلی اصلانی و همکاران (۱۴۰۰)، توانمندی‌های چندگانه زنجیره تأمین پایدار بر پایه هوش مصنوعی شامل توانمندی رقابت‌پذیری، عملیاتی، فناوری و تاب‌آوری را ارزیابی کردند [۶]. راه‌چمنی و همکاران (۱۴۰۱)، برای زنجیره تأمین هوشمند خدمات به مؤلفه‌هایی مانند جریان اطلاعات هوشمند، جریان منابع مالی هوشمند و فناوری اطلاعات، ارتباطات هوشمند، شفافیت، اشتراک‌گذاری و نیروی انسانی متخصص اشاره کردند [۸۵]. بهرامی و همکاران (۱۴۰۱)، مؤلفه‌های مؤثر بر ارزیابی آمادگی صنعت نسل چهارم را تحلیل و فقط به آمادگی نسل چهارم اشاره کردند [۷]. پژوهش‌های پیشین هریک به ابعاد مشخصی پرداخته است و بر بُعد خاصی مانند محیط‌زیست و یا اقتصادی و فناوری تمرکز کرده است؛ اما هیچ‌کدام از پژوهش‌های بررسی‌شده به تمام ابعاد در کنار یکدیگر نپرداخته و مدل جامعی از تأثیرگذاری ابعاد ارائه نکرده است. درواقع در پژوهش حاضر تمام ابعادی که می‌توانست بر توانمندسازی مدیریت زنجیره تأمین پایدار در صنعت ۴.۰ مؤثر باشد، شناسایی و اشتراکات و تفاوت‌های مقاله‌های داخلی و خارجی دسته‌بندی شد. درنهایت مدلی جامع از روابط بین ابعاد اصلی و همچنین روابط میان کُدهای محوری در هر دسته مشخص شد. مدل‌سازی در این پژوهش در دو سطح کلان و خُرد صورت گرفت که می‌توان این مهم را به‌عنوان نوآوری پژوهش محسوب کرد.

در بررسی یافته‌های پژوهش می‌توان بیان کرد که بُعد «فنّاوری» تأثیرگذارترین، بُعد «محصول» تأثیرپذیرترین و بُعد «اقتصادی» مهم‌ترین بُعد محسوب می‌شوند؛ همچنین در بُعد

فناوری، «زیرساخت» تأثیرگذارترین، «ادغام فنّاوری و سیستم تولید» تأثیرپذیرترین و این دو کُد محوری به‌عنوان مهم‌ترین توانمند شناسایی شدند که در پژوهش‌های کمالی سراجی[1] و همکاران (۲۰۲۱)، کومار[2] و همکاران (۲۰۲۱)، وانخده و وینوده[3] (۲۰۲۱)، راج[4] و همکاران (۲۰۱۹)، نیماوات و گیدوانی[5] (۲۰۲۱) و کومار و همکاران (۲۰۲۰)، نیز مورداشاره قرار گرفته است. این پژوهشگران معتقدند که زیرساخت‌های فناوری پیشرفته برای استفاده از اینترنت اشیا در تقویت اجرای صنعت ۴.۰ ضروری است. سیستم‌های فیزیکی سایبری با حسگرهای فوق‌پیشرفته ادغام می‌شوند و به سیستم‌های تولید برای کنترل و مدیریت فرآیندهای تولید با درک کیفیت و شرایط محصولات تولیدی متصل می‌شوند. این امر به زیرساخت‌های فناوری کافی نیاز دارد؛ زیرا نبود شبکه ارتباطی مؤثر و قدرت سیگنال ضعیف ممکن است کل فرآیند مؤثر بر کیفیت محصولات را مختل کند. درواقع صنعت ۴.۰ کاملاً به سیستم‌ها از طریق فناوری‌های اطلاعاتی وابسته است؛ بنابراین خرابی سیستم‌های میان‌مدت تا بلندمدت ناشی از ضعف امنیت سایبری، زیرساخت‌های فناوری و کل عملیات زنجیره تأمین را متوقف می‌کند و به ضرر مالی زیادی منجر خواهد شد. شرکت‌ها باید بر توسعه حاکمیت فناوری خوب در شبکه زنجیره تأمین برای پایداری تمرکز کنند. طبق نتایج پژوهش، بُعد «محصول» به‌عنوان تأثیرپذیرترین بُعد شناسایی شد. در این بُعد «دانش محصول» تأثیرگذارترین، «چرخه عمر محصول» تأثیرپذیرترین و «نوآوری محصول و خدمات» مهم‌ترین توانمند شناسایی شد. به‌منظور دستیابی به پذیرش موفق صنعت ۴.۰، نوآوری‌های مستمر در محصولات و خدمات موردنیاز است. به‌جای دستیابی به مزیت رقابتی با هزینه پایین، صنایع باید به سمت دستیابی به مزیت رقابتی از طریق نوآوری در بهره‌وری، حرفه‌ای‌گری، دانش و کیفیت محصولات و خدمات حرکت کنند. تحلیل چرخه عمر محصول مناسب و مفیدی را برای دستیابی به پایداری در سازمان‌های تولیدی به تصویر میکشد؛ همچنین برای چرخه عمر محصول سازمان‌ها باید به‌دقت مراحل مختلف محصول را بر اساس تجزیه‌وتحلیل چرخه حیات دنبال کنند تا کیفیت مطلوب و خدمات پس‌ازفروش را برآورده سازند؛ علاوه‌براین اتخاذ یک سیستم غیرمتمرکز و پیگیری مداوم موجودی و موجودی در فرآیند به اجرای روان کل سیستم تولید کمک می‌کند که در پژوهش‌های یاداو[6] و همکاران (۲۰۱۸) و استاک[7] و همکاران (۲۰۱۸)، نیز مورد اشاره قرار گرفته است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Kamali Saraji
2. Kumar
3. Wankhede & Vinodh
4. Raj
5. Nimawat & Gidwani
6. Yadav
7. Stock

از دیگر نتایج پژوهش، شناسایی بُعد اقتصادی به‌عنوان مهم‌ترین توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در زنجیره تأمین است که «درآمد» تأثیرگذارترین، «بودجه و ابزارهای مالی برای آموزش و تحقیق و توسعه» تأثیرپذیرترین و «کاهش هزینه‌های سازمان‌ها» مهم‌ترین توانمندسازهای صنعت ۴.۰ محسوب می‌شوند. اجرای صنعت ۴.۰ نیازمند سرمایه‌گذاری بسیار زیاد در مرحله اولیه برای توسعه زیرساخت‌های مناسب در سازمان‌ها است؛ به‌ویژه اجرای آن در صنایع کوچک‌تر تولیدی به دلیل بودجه ناکافی برای ترتیب‌دادن فناوری‌های پیشرفته دشوار است. فناوری‌هایی مانند IoT به سرمایه‌گذاری عظیمی نیاز دارند و همیشه ترس از ضرر اقتصادی وجود دارد؛ اما علی‌رغم این واقعیت که IoT نیازمند سرمایه‌گذاری زیاد در تأسیسات فناوری اطلاعات است، با چند ظرفیت کاهش هزینه از نظر واحدهای میانگین، عملیات، کارکنان و هزینه‌های تجهیز همراه است و در صورت استفاده خردمندانه می‌تواند دستاوردهای اقتصادی بزرگی برای سازمان‌های تولیدی از نظر ایجاد ارزش‌افزوده و رشد حجم فروش که به عملکرد مالی بهتر منجر می‌شود، به ارمغان بیاورد؛ درنتیجه مدیران نباید از سرمایه‌گذاری در آینده فناورانه دلسرد شوند؛ همچنین منابع درآمد جدید نسبت به محصول و خدمات جدید را می‌توان برای تأمین مالی سرمایه‌گذاری‌های کلان IT به‌جای بازارهای مالی که برای عملکرد مالی کوتاه‌مدت هستند، به‌کار برد. این مطالعه به دنبال یک چشم‌انداز استراتژیک بلندمدت و ایجاد ارزش پایدار است که سبب می‌شود شرکت تولیدی متحمل خسارت‌های کوتاه‌مدت شود؛ اما این به معنای تغییر در طرز تفکر مدیران و سرمایه‌گذاران برای بهره‌برداری از مزایای طولانی‌مدت و پایدار رویکرد تولید دیجیتال است. درنهایت اگرچه توانمندسازهایی که بیان شد از مهم‌ترین توانمندسازهای صنعت چهارم در زنجیره تأمین پایدار است؛ اما صنایع تولیدی برای اجرایی‌کردن صنعت ۴.۰ در زنجیره تأمین پایدار به توجه دیگر توانمندسازها نیز نیاز دارند. توجه به این توانمندسازها در هنگام اجرای صنعت ۴.۰ در شرکت‌های تولیدی می‌تواند پیاده‌سازی آن را برای مدیران و سرمایه‌گذاران شرکت تسهیل کرده و از دوباره‌کاری و هزینه‌های گزاف جلوگیری کند؛ بنابراین به مدیران و سرمایه‌گذاران پیشنهاد می‌شود بر اساس توانمندسازهایی که در این پژوهش شناسایی شد و همچنین میزان اهمیت آن‌ها در صنعت چهارم تصمیمات راهبردی خود را اتخاذ کنند. به پژوهشگران آتی نیز پیشنهاد می‌شود پژوهشی در این زمینه در صنایع خدماتی انجام دهند؛ زیرا توانمندسازها در صنایع خدماتی با تولیدی بسیار متفاوت است و ابعاد و مؤلفه‌های کاربردی را می‌توانند به‌وسیله مصاحبه با خبرگان تدوین کنند؛ همچنین می‌توانند دسته‌بندی کُدهای شناسایی‌شده را به‌وسیله تحلیل عاملی اکتشافی انجام دهند و اعتبارسنجی مدل به‌دست‌آمده در این پژوهش را در نمونه آماری آزمون کنند.

منابع

1. Andalib Ardakani, D., & Shams, S. (2020). Identification and modeling of green supply chain management in small and medium sized industries. *Journal of business administration researches, 12(23),* 169-193.
2. Bayati, KH., & Roghanian, E. (2021) Industrial symbiosis network optimization considering sustainable development characteristics, *Journal of Production and Operations Management, 12(24).*
3. Alaba, F.A., Othman, M., Hashem, I.A.T. & Alotaibi, F. (2017). Internet of things security: a survey. *Journal of Network and Computer Applications, 88,* 10-28.
4. Ardito, L., D'Adda, D., & Petruzzelli, A. M. (2018). Mapping innovation dynamics in the Internet of Things domain: Evidence from patent analysis. *Technological Forecasting and Social Change, 136,* 317-330.
5. Ajmera, P. & Jain, V. (2019a). Modeling the factors affecting the quality of life in diabetic patients in India using total interpretive structural modeling", *Benchmarking: An International Journal, 26(3),* 951-970.
6. Aslani Liaei, V., Abedi, S., Irajpour, A., & Ehtesham Rathi, R. (2021). Designing a Model for Evaluation of Sustainable Supply Chain Multi Capabilities Based on Artificial Intelligence. *The Journal of Industrial Management Perspective, 11(3),* 107-129.
7. Bahrami, M. R., Hashemzadeh, G. R., Shahmansoury, A., & Fathi Hafshejani, K. (2022). Analyzing Effective Components in Industry 4.0 Readiness Assessments. *Journal of Industrial Management Perspective*.
8. Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M. & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: an industry 4.0 perspective. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, 8(1),* 37-44.
9. Bag, S., & Pretorius, J. H. C. (2022). Relationships between industry 4.0, sustainable manufacturing and circular economy: proposal of a research framework. *International Journal of Organizational Analysis, 30*(4), 864-898..
10. Benias, N., & Markopoulos, A.P. (2017). A review on the readiness level and cyber-security challenges in Industry 4.0. *Conference on Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media, IEEE, Kastoria,* 1-5.
11. Beekaroo, D., Callychurn, D.S., & Hurreeram, D.K. (2019). Developing a sustainabilityindex for Mauritian manufacturing companies. *Ecol. Indic., 96, 250–257*.
12. Bhatia, M.S., Jakhar, S.K., Mangla, S.K., & Gangwani, K.K. (2020). Critical factors to environment management in a closed loop supply chain. J. *Clean. Prod. 255, 120239*.
13. Berghaus, S.; & Back, A. (2016). Stages in Digital Business Transformation: Results of an Empirical Maturity Study. *In Proceedings of the Tenth Mediterranean Conference on Information Systems (MCIS), Paphos, Cyprus,* 4–6 September 2016. 40. Impuls: Industrie 4.0 Readiness.
14. Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (2020). Industry 4.0: how it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes e a literature review. *J. Clean. Prod.* 259, 120856.

15. Cezarino, L. O., Liboni, L. B., Oliveira Stefanelli, N., Oliveira, B. G., & Stocco, L. C. (2021). Diving into emerging economies bottleneck: Industry 4.0 and implications for circular economy. *Management Decision, 59(8),* 1841-1862.
16. Calabrese, A., Levialdi Ghiron, N., & Tiburzi, L. (2021). 'Evolutions' and 'revolutions' in manufacturers' implementation of industry 4.0: a literature review, a multiple case study, and a conceptual framework. *Production Planning & Control, 32(3),* 213-227.
17. Colotla, I., Fæste, A., Heidemann, A., Winther, A., Andersen, P. H., Duvold, T., & Hansen, M. (2016). Winning the Industry 4.0 race: How ready are Danish manufacturers. *Bost. Consult. Gr.*, 42.
18. Christians, A., & Liepin, M. (2017). The consequences of digitalization for German civil law from the national legislator's point of view. *Zeitschrift fuer Geistiges Eigentum/Intellectual Property Journal, 9(3),* 331-339.
19. Cai, W., hung Lai, K., Liu, C., Wei, F., Ma, M., Jia, S., Jiang, Z., Lv, L. (2019). Promotingsustainability of manufacturing industry through the lean energy-saving andemission-reduction strategy. *Sci. Total Environ. 665, 23–32.*
20. de Sousa Jabbour, A.B.L., Jabbour, C.J.C., Foropon, C., Filho, M.G. (2018). When titansmeet – can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable man-ufacturing wave? *The role of critical success factors. Technol. Forecast. Soc.Change 132, 18–25.*
21. Dujin, A., Geissler, C., & Horstk€otter. D. (2014). Think Act: Industry 4.0. Munich, Germany: Ronald Berger Strategy Consultants.
22. Erol, S., Jäger, A., Hold, P.; Ott, K., Sihn, W. (2016). Tangible Industry 4.0: A scenario-based approach to learning for the future of production. *Procedia CiRp, 54,* 13–18.
23. Fatimah, Y.A., Govindan, K., Murniningsih, R., Setiawan, A. (2020). Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: a case study of Indonesia. J. *Clean. Prod. 269,* 122263.
24. Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2018). A critical investigation of Industry 4.0 in man-ufacturing: theoretical operationalisation framework. *Prod. Plan. Control*., *29,* 633–644.
25. Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2021). Impact of Industry 4.0 on supply chain performance. *Production Planning & Control, 32*(1), 63-81.
26. Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. J. *Clean. Prod*. 252, 119869.
27. Gilchrist, A. (2016). Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. Springer, Heidelberg.
28. Gmelin, H., & Seuring, S. (2014). Achieving sustainable new product development byintegrating product life-*cycle management capabilities. Int. J. Prod. Econ*., *154,* 166–177.
29. Ghadimi, P., Wang, C., Lim, M.K., & Heavey, C. (2019). Intelligent sustainable supplierselection using multi-agent technology: theory and application for Industry 4.0supply chains. *Comput. Ind. Eng. 127,* 588–600.
30. Ghobakhloo, M. (2018). The Future of Manufacturing Industry: A Strategic Roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management, 29(6),* 910–936.

31. Gbededo, M.A., Liyanage, K., & Garza-Reyes, J.A. (2018). Towards a life cycle sustainabil-ity analysis: a systematic review of approaches to sustainable manufacturing. *J.Clean. Prod*. 184, 1002–1015,

32. Ghasemian Sahebi, I., Arab, A., & Sadeghi Moghadam, M.R. (2017). Analyzing the barri-ers to humanitarian supply chain management: a case study of the Tehran RedCrescent Societies. *Int. J. Disaster Risk Reduct*., 24, 232–241.

33. Grafström, J., & Aasma, S. (2021). *Breaking circular economy barriers. Journal of Cleaner Production, 292, 126002.*

34. Gupta, H., Kumar, A., & Wasan, P. (2021). Industry 4.0, cleaner production and circular economy: An integrative framework for evaluating ethical and sustainable business performance of manufacturing organizations. *Journal of Cleaner Production*, *295*, 126253.

35. Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, *89(1)*, 23-34.

36. Hong, P., Jagani, S., Kim, J., & Youn, S.H. (2019). Managing sustainability orientation: anempirical investigation of manufacturing firms. *Int. J. Prod. Econ*., *211*, 71–81.

37. Jain, V., & Soni, V.K. (2019). Modeling and analysis of FMS performance variables by fuzzy TISM. *Journal of Modelling in Management*, *14(1)*, 2-30.

38. Jabbour, D.S., Lopes, A.B., Jabbour, C.J.C., Foropon, C. & Godinho Filho, M. (2018a). When titans meet— can Industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*, *132(1)*, 18-25.

39. Iris group. (2013). Digitalisering af dansk erhvervsliv. [Digitalizing Danish Business Community], accessed 9 July 2019.

40. 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*, 408e425.

41. Kamali Saraji, M., Streimikiene, D., & Kyriakopoulos, G. L. (2021). Fermatean Fuzzy CRITIC-COPRAS Method for Evaluating the Challenges to Industry 4.0 Adoption for a Sustainable Digital Transformation. *Sustainability*, *13(17)*, 9577.

42. Kirchherr, J.W., Hekkert, M.P., Bour, R., Huijbrechtse-Truijens, A., Kostense-Smit, E., & Muller, J. (2017). *Breaking the Barriers to the Circular Economy.* https://dspace.lib rary.uu.nl/handle/1874/356517.

43. 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. J. *Clean. Prod*., *275*, 124063

44. 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.

45. Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig. J. (2013). Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Munich, Germany: Acatech

46. Katiyar, R., Meena, P.L., Barua, M.K., Tibrewala, R., & Kumar, G. (2018). Impact of sus-tainability and manufacturing practices on supply chain performance: findingsfrom an emerging economy. *Int. J. Prod. Econ. 197*, 303–316.

47. Kamble, S., Gunasekaran, A., Dhone, N.C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *Int. J. Prod. Res., 58*, 1319e1337.

48. Kamble, S.S., Gunasekaran, A., Gawankar, S.A., (2018)b. Sustainable Industry 4.0 frame-work: a systematic literature review identifying the current trends and futureperspectives. *Process Saf. Environ. Prot. 117,* 408–425.

49. Kagermann, H. (2015). Change through digitization-value creation in the age of Industry 4.0. in Albach, H., Meffert, H., Pinkwart, A. and Reichwald, R. (Eds), Management of Permanent Change, *Springer, Heidelberg, 23*-45.

50. Koch, V., Kuge, S., Geissbauer, R., & Schrauf, S. (2014). Industry 4.0: Opportunities and Challenges of the Industrial Internet, Strategy & PwC, available at: http://www.strategyand.pwc.com/reports/ industry-4-0 (accessed 10 March 2017).

51. Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons, 58(4),* 431-440.

52. Luthra, S., Mangla, S.K., & Yadav, G. (2019). An analysis of causal relationships amongchallenges impeding redistributed manufacturing in emerging economies. *J.Clean. Prod., 225,* 949–962.

53. Latif, H.H., Gopalakrishnan, B., Nimbarte, A., & Currie, K. (2017). Sustainability indexdevelopment for manufacturing industry. *Sustain. Energy Technol. Assessments., 24, 82*–95.

54. Liu, Y., Zhu, Q., & Seuring, S. (2017). Linking capabilities to green operations strategies:the moderating role of corporate environmental proactivity. *Int. J. Prod. Econ., 187,* 182–195.

55. Luthra, S., Kumar, A., Zavadskas, E.K., Mangla, S.K., & Garza-Reyes, J.A. (2020). Industry4.0 as an enabler of sustainability diffusion in supply chain: an analysis of influential strength of drivers in an emerging economy. *Int. J. Prod. Res., 58(5),* 1505e1521.

56. Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E.d.F.R. & Ramos, L.F.P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research, 55(12),* 3609-3629.

57. Müller, J.M., Buliga, O., & Voigt, K.I. (2018). Fortune favors the prepared: how SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change, 132,* 2-17

58. Mangla, S. K., Sharma, Y. K., Patil, P. P., Yadav, G., & Xu, J. (2019). Logistics and distribution challenges to managing operations for corporate sustainability: study on leading Indian diary organizations. *Journal of Cleaner Production, 238,* 117620.

59. Machado, C.G., Winroth, M.P., & Ribeiro da Silva, E.H.D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *Int. J. Prod. Res., 58,* 1462e1484.

60. Mahpour, A. (2018). Prioritizing barriers to adopt circular economy in construction and demolition waste management. *Resources, Conservation and Recycling, 134, 216–227.*

61. Mani, V., & Gunasekaran, A. (2018). Four forces of supply chain social sustainabilityadoption in emerging economies. *Int. J. Prod. Econ., 199,* 150–161.

62. Majumdar, A., Sinha, S. K., & Govindan, K. (2021). *Prioritising risk mitigation strategies for environmentally sustainable clothing supply chains: Insights from selected organisational theories. Sustainable Production and Consumption, 28, 543–555.*

63. Nimawat, D & Gidwan, B.D. (2021). Prioritization of barriers for Industry 4.0 adoption in the context of Indian manufacturing industries using AHP and ANP

analysis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 34(11),* 1139-1161
64. Nujoom, R., & Mohammed, A. (2019). Drafting a cost-effective approach towards a sus-tainable manufacturing system design. *Comput. Ind. Eng., 133*, 317–330.
65. Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in industry, 83*, 121-139.
66. Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). Industry 4.0 in management studies: A systematic literature review. *Sustainability, 10(10),* 3821.
67. 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*, 507e528.
68. Prause, M. (2019). Challenges of Industry 4.0 Technology Adoption for SMEs: The Case of Japan. *Sustainability, 11(20),* 5807.
69. Peillon, S., & Dubruc, N. (2019). Barriers to Digital Servitization in French Manufacturing SMEs. *Procedia CIRP, 83*, 146–150.
70. Pacaux-Lemoine, M.-P., & Trentesaux, D. (2019). Ethical risks OF human-machine symbiosis IN industry 4.0: insights from the human-machine cooperation approach. *IFAC-PapersOnLine, 52*, 19e24.
71. Pereira, T., Barreto, L., & Amaral, A. (2017). Network and information security challenges within Industry 4.0 paradigm. *Procedia Manufacturing, 13*, 1253-1260.
72. Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R.-C., Reichstein, C., Neumaier, P., & Jozinović, P. (2015). Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results. paper presented at BIS 18th International Conference on Business Information Systems, Poznań, Springer International Publishing, June.
73. Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. *Journal of Industrial Ecology, 23*(1), 77-95.
74. Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management, 9(3),* 811-833.
75. Stoycheva, S., Marchese, D., Paul, C., Padoan, S., salam Juhmani, A., & Linkov, I. (2018). Multi-criteria decision analysis framework for sustainable manufacturing inautomotive industry. *J. Clean. Prod., 187*, 257–272,
76. Stentoft, J., & Rajkumar, C. (2020). The Relevance of Industry 4.0 and Its Relationship with Moving Manufacturing out, Back and Staying at Home. *International Journal of Production Research, 58 (10),* 2953–2973.
77. Devi K, S., Paranitharan, K. P., & Agniveesh A, I. (2021). Interpretive framework by analysing the enablers for implementation of Industry 4.0: an ISM approach. *Total Quality Management & Business Excellence, 32*(13-14), 1494-1514.
78. Schwab, L., Gold, S., & Reiner, G. (2019). Exploring financial sustainability of SMEs during periods of production growth: a simulation study. *Int. J. Prod. Econ. 212*, 8e18.
79. Sung, T.K. (2018). Industry 4.0: a Korea perspective. *Technological Forecasting and Social Change, 132*, 40-45.
80. Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP, 40(1),* 536–541.

81. Shivajee, V., Singh, R.K., & Rastogi, S. (2019). Manufacturing conversion cost reduction using quality control tools and digitization of real-time data. *J. Clean. Prod., 237,* 117678.
82. Singh, R.K., Kumar, A., Garza-Reyes, J.A., de S´a, M.M., (2020). Managing operations for circular economy in the mining sector: an analysis of barriers intensity. *Resour. Policy, 69,* 101752
83. Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C. & Hauptvogel, A. (2013). Sustainable increase of overhead productivity due to cyber-physical-systems. *Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Innovation Solutions*, 332-335
84. Rajak, S., & Vinodh, S. (2015). Application of fuzzy logic for social sustainabilityperformance evaluation: a case study of an Indian automotive component man-ufacturing organization. *J. Clean. Prod. 108*, 1–9.
85. Rahchamani, S. M., Heydariyeh, S. A., & Zargar, S. M. (2022). Designing a Model for Intelligent Service Supply Chain Based on Grounded Theory (Case Study: Omid Entrepreneurship Fund). *The Journal of Industrial Management Perspective, 12(2),* 89-111.
86. Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, *224*, 107546.
87. Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP, 52,* 173-178.
88. Tseng, M.L., Wu, K.J., Hu, J., & Wang, C.H. (2018). Decision-making model for sustainablesupply chain finance under uncertainties. *Int. J. Prod. Econ., 205,* 30–36.
89. Trappey, A. J. C., C. V. Trappey, U. H. Govindarajan, A. C. Chuang, & Sun, J. J. (2017). A Review of Essential Standards and Patent Landscapes for the Internet of Things: A Key Enabler for Industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics, 33,* 208–229.
90. Tortorella, G.L., & Fettermann, D. (2018). Implementation of Industry 4.0 and lean pro-duction in Brazilian manufacturing companies. *Int. J. Prod. Res. 56*, 2975 -2987.
91. Thakur, V., & Mangla, S.K, (2019). Change management for sustainability: evaluating the role of human, operational and technological factors in leading Indian firms in home appliances sector. *J. Clean. Prod., 213,* 847e862.
92. Vigneshwaran, S., Uthayakumar, M., & Arumugaprabu, V. (2020). Potential use of industrial waste-red mud in developing hybrid composites: A waste management approach. *Journal of Cleaner Production, 276*, 124278.
93. Walendowski, J., H. Kroll, & Schnabl. E. (2016). Regional Innovation Monitor Plus 2016: Thematic Paper 3–Industry 4.0, Advanced Materials (Nanotechnology). Brussels: The European Commission.
94. Wankhede, V. A., & Vinodh, S. (2021). Analysis of Industry 4.0 Challenges using Best Worst Method: A case study. *Computers & Industrial Engineering 159(3)*, 107487.
95. Wang, Y., Ma, H.-S., Yang, J.-H. & Wang, K.-S. (2017). Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. *Advances in Manufacturing, 5(4),* 311-320.
96. Wagire, A. A., Joshi, R., Rathore, A. P. S., & Jain, R. (2020). Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice. *Production Planning & Control, 1–20.*

97. Xu, Da L., Xu, E.L., Li, L., (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *Int. J.Prod. Res., 56,* 2941–2962.
98. Yadav, G., Luthra, S., Jakhar, S.K., Mangla, S.K., & Rai, D.P. (2020). A framework to over-come sustainable supply chain challenges through solution measures of industry4.0 and circular economy: an automotive case. *J. Clean. Prod. 254,* 120112.
99. Yadav, G., Mangla, S.K., Luthra, S., & Jakhar, S. (2018). Hybrid BWM-ELECTRE-based deci-sion framework for effective offshore outsourcing adoption: a case study. *Int. J.Prod. Res. 56,* 6259–6278.
100. Zarte, M., Pechmann, A., & Nunes, I.L., (2019). Decision support systems for sustainablemanufacturing surrounding the product and production life cycle – a literaturereview. *J. Clean. Prod., 219,* 336–349.
101. Zhang, Y., Sun, J., Yang, Z., & Wang, Y. (2020). Critical success factors of green innova-tion: technology, organization and environment readiness. *J. Clean. Prod. 264,* 121701.
102. Zhou, K., Liu, T. & Zhou, L. (2015). Industry 4.0: towards future industrial opportunities and challenges", 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, IEEE, *Zhangjiajie, 2147-2152,*

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی