پژوهش‌های مدیریت منابع سازمانی
دوره ۱۵، شماره ٤، زمستان ١٤٠٤

تحلیل علی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ در صنعت فولاد (موردمطالعه: فولاد خوزستان)

الناز نصیری دهج[۱]، داود عندلیب اردکانی[۲*]

۱- دانشجو دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

دریافت: ١٤٠٤/٠٨/٠٦ **بازنگری:** ١٤٠٤/٠٩/٢٩
پذیرش: ١٤٠٤/١١/١١ **انتشار:** ١٤٠٥/٠٢/٢٣

چکیده

اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ به‌عنوان دو رویکرد تحول‌آفرین در صنعت فولاد، هم‌زمان اهداف پایداری زیست‌محیطی و ارتقای بهره‌وری را دنبال می‌کنند. این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل چالش‌های کلیدی پیاده‌سازی این دو رویکرد در شرکت فولاد خوزستان انجام شد. نخست با مرور نظام‌مند ادبیات و بهره‌گیری از یافته‌های پیشین، مجموعه‌ای از چالش‌ها در ده بعد اصلی شناسایی شد. سپس برای بررسی روابط علی و معلولی بین چالش‌ها از روش دیمتل فازی استفاده شد. نتایج نشان داد که در بعد منابع انسانی و مدیریت تغییر «ترس از کاهش جایگاه شغلی» و «ترس از انتقاد و نظارت»، در بعد مهارت‌های فنی «نیاز به آموزش‌های پیشرفته» و «نبود دانش تخصصی»، در بعد هزینه و بودجه «نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا» و «نیاز به نگهداری و ارتقای مستمر»، در بعد امنیت و حریم خصوصی «امنیت اطلاعات» و «ضعف سیاست‌های امنیتی»، در بعد توسعه فناوری «نبود زیرساخت شبکه» و «کمبود فناوری‌های بهبود»، در بعد پیچیدگی یکپارچگی «کمبود آگاهی از فناوری‌های نوین» و «کمبود

* نویسنده مسئول مقاله: E-mail: andalib@yazd.ac.ir

شیوه‌نامه‌های اشتراک داده»، در بعد کلان داده و تحلیل‌ها «چالش ترکیب منابع مختلف داده» و «تفاوت در تفسیر داده‌ها»، در بعد راهبرد «نبود حمایت دولتی مؤثر» و «عدم برنامه‌ریزی برای صنایع نوین»، در بعد الگو مشارکتی «شکاف زیرساختی» و «ناسازگاری انسان و ماشین» و درنهایت در بعد آثار زیست‌محیطی «نبود قوانین زیست‌محیطی» و «کاهش منابع طبیعی» به‌ترتیب تأثیرگذارترین و تأثیرپذیرترین چالش‌ها به‌شمار می‌آیند.

واژه‌های کلیدی: اقتصاد مدور، صنعت ٤/٠، چالش‌ها و مانع‌ها، تحلیل علی و معلولی، دیمتل فازی.

۱- مقدمه

در صنعت تولید امروزی، اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ به‌عنوان دو محور کلیدی در مسیر تحول و پایداری مطرح شده‌اند. صنایع تولیدی در بازار جهانی با چالش‌هایی جدی همچون کمبود منابع، ناکارآمدی فرایندهای سنتی و بهره‌گیری نکردن مؤثر از فناوری‌های نوین مواجه‌اند. این شرایط نه‌تنها تهدیدی برای بقا و رقابت‌پذیری این صنایع محسوب می‌شود، بلکه کاهش تدریجی نرخ تولید را به‌همراه داشته و محیطی ناپایدار ایجاد کرده است. در چنین بستری، اقتصاد مدور نقش حیاتی در مدیریت کارآمد منابع، کاهش ضایعات و بهره‌گیری از فناوری‌های صنعت ٤/٠ برای پاسخ‌گویی به نیازهای تولید ایفا می‌کند (Sahu, Khandelwal, et al., 2023).

گذار از الگوی خطی «تولید- مصرف- دورریز» به سمت اقتصاد مدور، به‌عنوان یکی از امیدبخش‌ترین مسیرها برای دستیابی به توسعه پایدار مطرح است. اقتصاد مدور رویکردی نظام‌مند مبتنی بر اصول کاهش، استفاده دوباره و بازیافت است که به ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی هم‌زمان توجه می‌کند. در عصر حاضر، بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از الگو خطی و محدودیت فزاینده منابع طبیعی، سازمان‌ها و دولت‌ها را به پذیرش اقتصاد مدور به‌عنوان یک پارادایم ضروری برای آینده سوق داده است. این رویکرد با بازطراحی زنجیره ارزش، بازیابی مواد و حداقل‌سازی ضایعات، علاوه‌بر کاهش ردپای اکولوژیکی، فرصت‌های اقتصادی چشمگیری را تا سال ۲۰۳۰ نوید می‌دهد (Dorrego-Viera et al., 2025).

برای تحقق اصول اقتصاد مدور در عمل، بهره‌گیری از فناوری‌های صنعت ٤/٠ همچون داده‌های بزرگ، اینترنت اشیا و بلاک‌چین اهمیت ویژه‌ای دارد. این فناوری‌ها به‌عنوان توانمندسازان کلیدی، امکان بازپیکربندی زنجیره تأمین، افزایش انعطاف‌پذیری در پاسخ به تقاضا، بهبود برنامه‌ریزی و پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرایندها را فراهم می‌کنند (Theeraworawit et al., 2022). ابزارهایی مانند اینترنت اشیا با قابلیت پایش بلادرنگ منابع، بلاک‌چین برای ایجاد شفافیت و قابلیت ردیابی مواد و هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی چرخه‌های بازیافت در حال دگرگون‌سازی الزام‌های زنجیره تأمین پایدار به‌شمار می‌آیند. شواهد پژوهشی نیز نشان می‌دهد که ادغام این فناوری‌ها می‌تواند بهره‌وری مواد اولیه را افزایش داده و به کاهش انتشار کربن منجر شود (Rosário & Dias, 2023). بااین‌حال، اجرای هم‌زمان اقتصاد مدور و فناوری‌های صنعت ٤/٠ در صنایع تولیدی بدون چالش نیست. محدودیت‌های فناورانه، موانع سازمانی، کمبود زیرساخت‌ها، مقاومت کارکنان و هزینه‌های پیاده‌سازی ازجمله موانعی هستند که می‌توانند موفقیت این گذار را با مشکل مواجه کنند. بحران‌های زیست‌محیطی نظیر کاهش منابع طبیعی، تغییرات اقلیمی و انباشت ضایعات صنعتی نیز لزوم بازنگری در پارادایم‌های سنتی مدیریت زنجیره تأمین را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در چنین شرایطی، اقتصاد مدور به‌عنوان راهبردی تحول‌آفرین مطرح است که با بازطراحی فرایندها بر مبنای اصول بازیافت و بازتولید، به‌دنبال خلق ارزش پایدار و کاهش آثار اکولوژیکی است (Liu et al., 2025).

با توجه به اهمیت موضوع، هدف اصلی این مطالعه شناسایی و تحلیل روابط علی بین چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ در صنعت فولاد است. به‌این‌منظور، از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره دیمتل فازی استفاده خواهد شد تا علاوه بر شناسایی چالش‌ها، روابط علی و معلولی میان آنها نیز تحلیل شود. در همین راستا، پژوهش حاضر بهدنبال پاسخ به پرسش‌های زیر است:

- چالش‌های اصلی در مسیر پیاده‌سازی صنعت ٤/٠ و اقتصاد مدور در صنعت فولاد کدام‌اند؟
- تأثیرگذارترین و تأثیرپذیرترین چالش‌های پیاده‌سازی صنعت ٤/٠ و اقتصاد مدور در صنعت فولاد کدام‌اند؟

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش از پژوهش، با هدف ارائه بنیان نظری مستحکم برای تحلیل موضوع، به بررسی مفاهیم پایه‌ای اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ پرداخته شده است.

۲-۱- اقتصاد مدور

اقتصاد مدور یک الگو اقتصادی جایگزین برای اقتصاد خطی سنتی است که به‌جای تولید- مصرف- دور ریختن، بر بازیافت، استفاده دوباره، بازسازی و کاهش ضایعات تمرکز دارد. هدف اصلی این الگو، افزایش کارایی منابع، کاهش آثار زیست‌محیطی و حفظ ارزش مواد در طولانی‌مدت است. به اقتصاد مدور به‌عنوان یک رویکرد مؤثر برای ارتقای پایداری و رقابت‌پذیری مشترک توجه شده است (Reim et al., 2025). اقتصاد مدور با اقتصاد خطی متفاوت است و شرکت‌هایی که تصمیم به طراحی دوباره زنجیره تأمین خود برای اقتصاد مدور دارند، می‌توانند مزایای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی را کسب کنند. مفهوم اقتصاد مدور به‌عنوان یک رویکرد عملی با هدف استفاده پایدار از منابع طبیعی محدود برای ایجاد تعادل بین اقتصاد، محیط‌زیست و جامعه پیشنهاد شده است. به‌طورکلی اقتصاد مدور جایگزین شیوه‌های صنعتی سنتی شده و راه را برای الگوهای اقتصادی حلقه بسته جدید با محوریت متعادل‌کردن آثار اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی محصولات و فرایندها هموار کرده است (Musova et al., 2025).

۲-۲- صنعت ٤/٠

صنعت ٤/٠ نشان‌دهنده دوران جدیدی در تولید است. این دوران با پیوند فناوری اطلاعات و فناوری‌های دیجیتال پیچیده شناخته می‌شود. یکی از ویژگی‌های اصلی صنعت ٤/٠، ماهیت متصل آن است؛ صنعتی که می‌تواند داده‌ها را بین ماشین‌ها، کارکنان و سایر صاحبان منفعت از راه اینترنت اشیا (IoT) و سایر ابزارهای الکترونیکی تبادل کند. این اتصال به شرکت‌ها کمک می‌کند تا راه‌حل‌های تصمیم‌گیری خودسازمان‌دهنده و اتوماسیون را در خط تولید به‌کار گیرند.

این مفهوم همچنین در زمینه تولید و محصولات هوشمند مطرح می‌شود که در آن اشیا شامل ماشین‌ها، قطعه‌ها و دستگاه‌ها قادر به مدیریت خطوط تولید، بهبود جریان کار و پیکربندی سیستم‌های طراحی- تولید- لجستیک در نظر گرفته می‌شوند. کنترل و انعطاف‌پذیری، بهینه‌سازی و سازگاری، ویژگی‌های اصلی تعریف‌کننده فرایندهای صنعت ٤/٠ هستند (Singh et al., 2025). صنعت ٤/٠ امکان پایش مستمر و کنترل کاربر - محور عوامل حیاتی تولید مانند انرژی، جریان مواد، وضعیت سفارش و تأمین‌کنندگان را فراهم می‌کند. همچنین، لجستیک ٤/٠ نیز با بهبود زنجیره تأمین تحت انقلاب صنعت ٤/٠ توسعه پیدا کرده است. علاوه‌براین، با پیوند محصولات به رابط‌های کاربری مشتری، روابط با مشتری را تقویت می‌کند و به‌این‌ترتیب سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا تولید را براساس نیازهای واقعی مشتریان هدایت کنند (S. Khan et al., 2022). به‌تازگی، صنعت ٤/٠ به‌عنوان مجموعه‌ای از فناوری‌های پیشرفته تعریف شده است که توسعه زنجیره‌های ارزش را ارتقا می‌دهد و منجر به زمان‌های تحویل کوتاه‌تر، بهبود کیفیت محصول و افزایش عملکرد سازمانی می‌شود (Harikannan & Vinodh, 2025). جدول ١ مروری بر برخی از مطالعات مرتبط با نقش فناوری‌های نوین صنعت ٤/٠ در حمایت از اقتصاد مدور ارائه می‌دهد.

جدول ١. مرور پژوهش‌های مرتبط با فناوری‌های نوین در اقتصاد مدور

نویسنده/ سال	موضوع مطالعه	یافته‌های اصلی	نقش فناوری نوین در اقتصاد مدور	منبع
Cubric (2020)	بررسی محرک‌ها و موانع اجتماعی هوش مصنوعی	عوامل فرهنگی، فنی و اقتصادی مانع پذیرش کامل هوش مصنوعی هستند.	اهمیت شناسایی موانع اجتماعی و فرهنگی به‌عنوان چالش‌های کلیدی در پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠	(Cubric, 2020)
Zheng et al. (2020)	مروری بر قراردادهای هوشمند بلاک‌چینی	بلاک‌چین موجب شفاف شدن و اعتماد در تراکنش‌ها می‌شود.	شفاف بلاک‌چین در زنجیره‌تأمین سازی	Zheng et al.,) (2020

نویسنده/ سال	موضوع مطالعه	یافته‌های اصلی	نقش فناوری نوین در اقتصاد مدور	منبع
Bianco (2021)	غلبه بر موانع اجتماعی در پذیرش هوش مصنوعی	عوامل اجتماعی و فرهنگی نقش مهمی در پذیرش فناوری دارند.	شناسایی موانع اجتماعی پذیرش فناوری	(Bianco, 2021)
Modgil et al. (2022)	نقش هوش مصنوعی در تاب‌آوری زنجیره تأمین در دوران کووید ۱۹	هوش مصنوعی باعث پیش‌بینی بهتر و انعطاف‌پذیری در بحران شد	نشان می‌دهد هوش مصنوعی می‌تواند تاب‌آوری زنجیره تأمین را افزایش دهد و در اولویت‌بندی چالش‌های فناورانه باید مدنظر باشد.	(Modgil et al., 2022)
Lestari et al. (2022)	تاب‌آوری کسب‌وکارهای کوچک با توجه به سواد مالی و فناوری	سواد مالی و حمایت دولت نقش کلیدی در پذیرش فناوری دارد.	بیان نقش آموزش و حمایت‌های نهادی به‌عنوان عوامل کلیدی در غلبه بر چالش‌های پذیرش فناوری‌های مدور	(Lestari et al., 2022)
Wang et al. (2023)	زنجیره تأمین محصولات کشاورزی سبز با بازاریابی داده‌محور	داده‌های بزرگ موجب بهبود بازاریابی و ردیابی محصولات سبز شد.	نشان‌دهنده اهمیت داده‌های بزرگ در شفاف بودن و رهگیری زنجیره تأمین پایدار	(Wang et al., 2023)
Lin (2024)	زنجیره تأمین مدور برای تولید هوشمند در صنعت ٤/٠	فناوری‌های دیجیتال موجب بهبود تصمیم‌گیری و بازچرخانی شدند	دوقلوهای دیجیتال و اینترنت اشیا در بهینه‌سازی چرخه مواد	(Lu et al., 2024)
Ciano(2025)	چارچوب 10R برای اقتصاد مدور	دوقلوهای دیجیتال و اینترنت اشیا و داده های بزرگ از مفاهیم 10R پشتیبانی می‌کنند.	نشان می‌دهد فناوری‌های دیجیتال در حمایت از راهبردهای اقتصاد مدور (10R) نقش کلیدی دارند.	(Ciano et al., 2025b)

نویسنده/ سال	موضوع مطالعه	یافته‌های اصلی	نقش فناوری نوین در اقتصاد مدور	منبع
Kumar & Kandpal (2025)	عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های صنعت ٤/٠ در اقتصاد مدور	امنیت، سیاست‌های حمایتی و زیرساخت‌ها از عوامل کلیدی‌اند و فناوری‌ها ضایعات را کاهش می‌دهند.	ضرورت توجه به سیاست‌ها، امنیت داده‌ها در شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌های پیاده‌سازی	(Kumar & Kandpal, 2025)
Bashynska (2024)	تحلیل زنجیره تأمین باهوش مصنوعی برای مدیریت منابع	هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و داده‌های بزرگ گذار به زنجیره تأمین مدور را تسریع می‌کنند.	نقش تحلیل داده‌های هوشمند در بهبود چرخه‌پذیری و کارایی زنجیره تأمین	(Bashynska & Prokopenko, 2024)
Mankata (2025)	چارچوب بلاک‌چین در زنجیره تأمین مدور	بلاک‌چین منجربه شفاف بودن و کارایی بیشتر در زنجیره تأمین مدور می‌شود.	اهمیت استفاده از بلاکچین به‌عنوان ابزاری برای غلبه بر چالش شفاف بودن و رهگیری در زنجیره‌ای مدور	(Mankata et al., 2025)

مرور ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش‌های پیشین به ابعاد مختلف پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ پرداخته‌اند. بخشی از پژوهش‌ها بر عوامل اجتماعی– فرهنگی و حمایتی تمرکز داشته‌اند و نشان داده‌اند که پذیرش فناوری‌های نوین بدون درنظر گرفتن موانع فرهنگی، سواد مالی و حمایت نهادی با مشکل مواجه خواهد شد. بخش دیگری از پژوهش‌ها بر توانمندسازهای فناورانه تأکید داشته و نقش فناوری‌هایی همچون AI، IoT، Big Data، Digital Twin و Blockchain را در بهبود تاب‌آوری، بازچرخانی، شفاف بودن و رهگیری زنجیره تأمین بررسی کرده‌اند. همچنین، برخی مطالعات چارچوب‌های مفهومی همچون ۱۰R را برای اقتصاد مدور معرفی کرده و نشان داده‌اند که فناوری‌های دیجیتال نقش حیاتی در تحقق این رویکرد دارند.

اگرچه این مطالعات ارزشمند به‌نظر می‌رسند، اما اغلب به‌صورت پراکنده به موضوع‌های مختلف پرداخته‌اند و کمتر پژوهشی به بررسی چالش‌های هم‌زمان صنعت ٤/٠ و اقتصاد مدور در صنایع تولیدی پرداخته است. علاوه‌براین، در اغلب موارد فقط به معرفی فناوری‌ها یا عوامل پذیرش پرداخته شده و به روابط علی میان چالش‌ها کمتر توجه شده است. این خلأ نشان می‌دهد که هنوز نیاز به پژوهش‌هایی وجود دارد که نه‌تنها چالش‌ها را شناسایی کنند، بلکه روابط اثرگذاری و تأثیرپذیری آنها بر یکدیگر را نیز تحلیل کنند. در همین راستا، پژوهش حاضر با استفاده از روش دیمتل فازی به شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور و فناوری‌های صنعت ٤/٠ در صنایع تولیدی و به‌طور خاص در صنعت تولید فولاد به‌عنوان یکی از صنایع راهبردی و آلاینده کشور می‌پردازد. این روش به‌دلیل قابلیت آن در تعیین ساختار روابط علی و معلولی میان عوامل پیچیده می‌تواند تصویری جامع از اهمیت نسبی و تأثیر متقابل چالش‌ها ارائه دهد. به‌این‌ترتیب، پژوهش حاضر نه‌تنها به ادبیات موجود در حوزه اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ کمک می‌کند، بلکه بینش کاربردی برای مدیران و سیاست‌گذاران در مسیر گذار به تولید پایدار فراهم می‌سازد.

۳- روش پژوهش

این پژوهش از نظر هدف جزء پژوهش‌های کاربردی است تا راهکارهایی عملی برای مدیران و سیاست‌گذاران ارائه کند و از نظر راهبرد توصیفی- تحلیلی است؛ یعنی نخست به شناسایی و توصیف چالش‌ها پرداخته است و سپس روابط بین آنها را تحلیل کرده است. روش مرور نظام‌مند یک روش منظم و ساختاریافته برای جمع‌آوری، ارزیابی و تحلیل ادبیات موجود در مورد یک موضوع خاص است. این روش به‌منظور اطمینان از کامل‌بینی و شفاف بودن در پژوهش استفاده می‌شود و شامل چندین مرحله منظم و دقیق است. در ادامه، مراحل اصلی مرور نظام‌مند توضیح داده می‌شود:

۱. تعیین موضوع و پرسش پژوهش: نخست باید موضوع و پرسش پژوهش به‌طور دقیق تعریف شود. این پرسش باید مشخص و قابل پاسخ باشد و شامل کلیدواژه‌های اصلی

و معیارهای شامل حوزه پژوهش باشد. چالش‌های پیاده‌سازی صنعت ٤/٠ و اقتصاد مدور در صنعت فولاد چیست؟

۲. تعیین معیارهای شامل حوزه باید معیارهایی برای شامل حوزه کردن و حذف مقاله‌ها تعیین شود. این معیارها می‌توانند شامل نوع مطالعه، زبان، سال انتشار و دیگر ویژگی‌های مرتبط باشند. مقاله‌های منتشر شده بین سال‌های ۲۰۱٦ تا ۲۰۲۵ به زبان انگلیسی، پژوهش‌های کیفی و کمی، پژوهش‌های موردی و تحلیلی است.

۳. جستجوی ادبیات: جستجوی نظام‌مند در منابع معتبر مانند پایگاه‌های داده علمی (Google Scholar, IEEE Xplore, Scopus, Web of Science) انجام شده است. جستجو باید شامل کلیدواژه‌های مرتبط با موضوع و معیارهای شامل حوزه باشد. در این پژوهش، جستجو با کلیدواژه‌های

"Circular economy" OR "Circularity"AND"Industry4.0" OR "I4.0" AND "challenges" OR "barriers"

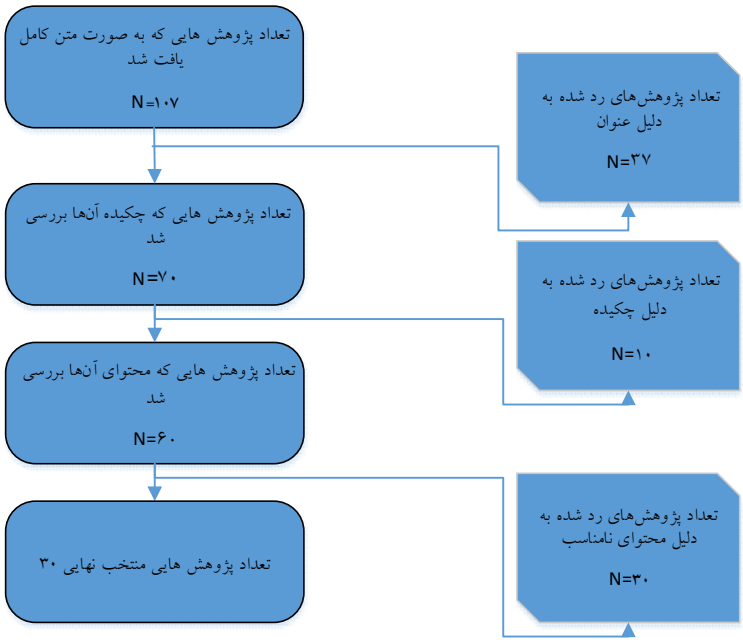
انجام شده است.

٤. مقاله‌های پیدا شده در مرحله جستجو باید براساس معیارهای شامل حوزه ارزیابی شوند. این مرحله به‌طور معمول در دو مرحله انجام می‌شود: مرحله اول: براساس عنوان و چکیده مقاله‌ها. مرحله دوم: براساس مطالعه کامل مقاله‌ها. در مرحله اول، مقاله‌هایی که عنوان و چکیده آنها با موضوع پژوهش تطابق ندارند، حذف می‌شوند. در مرحله دوم، مقاله‌هایی که مطابق با معیارهای شامل حوزه نیستند، حذف می‌شوند.

۵. استخراج داده‌ها: داده‌های مورد نیاز از مقاله‌های انتخاب شده استخراج می‌شوند. این داده‌ها می‌توانند شامل ویژگی‌های مطالعه، نتایج، روش‌ها و دیگر اطلاعات مرتبط باشند.

٦. تحلیل داده: تحلیل داده‌های استخراج شده از مقاله‌ها باید تحلیل شوند. این تحلیل می‌تواند شامل تحلیل‌های توصیفی، تحلیل‌های آماری و یا تحلیل‌های کیفی باشد، مانند تحلیل توصیفی نتایج پژوهش‌ها، تحلیل آماری نتایج و مقایسه نتایج مختلف و درنهایت نتیجه به‌دست‌آمده نیز گزارش و ارائه شود (Pilipenets et al., 2025). شکل ۱ نشان می‌دهد که از ۱۰۷ مقاله یافت شده، ۳۷ مورد بر اثر مقایسه عنوان، ۱۰

مورد بر اثر بررسی چکیده و ۳۰ مورد از نظر بررسی متون و محتوای مقاله هم‌خوانی نداشتند که حذف شدند و تعداد ۳۰ مقاله تأیید شد که هم از نظر عنوان و هم از نظر محتوا هم‌راستا با این پژوهش بودند.



شکل ۱. تعداد کل پژوهش‌های شناسایی‌شده مرتبط با موضوع

در این پژوهش، برای کاوش روابط علت و معلولی و تعیین میزان درجه تأثیرگذاری و تأثیرپذیری هریک از ابعاد از یکدیگر از روش دیمتل فازی براساس مراحل زیر استفاده شد (Ahmad et al., 2024).

۱. شناسایی معیارها: براساس مرور ادبیات، ده معیار اصلی شامل منابع انسانی و مدیریت تغییر، مهارت‌های فنی، هزینه و بودجه، امنیت و حریم خصوصی، توسعه فناوری،

پیچیدگی در یکپارچگی، کلان داده و تحلیل‌ها، کمبود راهبرد، الگو مشارکتی و آثار زیست‌محیطی استخراج شدند.

۲. تشکیل ماتریس تأثیرات مستقیم (D): با استفاده از پرسش‌نامه مقایسات زوجی و امتیازدهی خبرگان صنعت فولاد میزان تأثیر هر معیار بر سایر معیارها در مقیاس ۰ تا ٤ (۰ = بدون تأثیر، ٤ = تأثیر بسیار زیاد) تعیین شد. خروجی این مرحله، یک ماتریس ۱۰×۱۰ بود که در آن مقادیر قطر اصلی صفر در نظر گرفته شدند (جدول ۲).

جدول ۲. اعداد فازی مثلثی متغیرهای کلامی میزان اثرگذاری ابعاد و عوامل آن 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 ۰/۷۵و ۰/۵)
تأثیر خیلی زیاد	٤	(۱ و ۱ و ۰/۷۵)

۳. نرمال‌سازی ماتریس: برای نرمال کردن ماتریس ارتباط مستقیم فازی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

رابطه (۱)

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{\tilde{z}_{ij}}{r} = \left(\frac{l_{ij}}{r}, \frac{m_{ij}}{r}, \frac{u_{ij}}{r}\right)$$

که

$$r = \max_{i,j}\left\{\max_{i}\sum_{j=1}^{n} u_{ij}\,, \max_{j}\sum_{i=1}^{n} u_{ij}\right\} \qquad i,j \in \{1,2,3,\dots,n\}$$

٤. محاسبه ماتریس کل تأثیرات (T): در این گام براساس رابطه زیر، ماتریس فازی روابط کل تشکیل می‌شود:

رابطه (۲)

$$\tilde{T} = \lim_{k\to+\infty}(\tilde{x}^1 \oplus \tilde{x}^2 \oplus \dots \oplus \tilde{x}^k)$$

اگر هر درایه عدد فازی ماتریس روابط کل به‌صورت $\tilde{t}_{ij} = (l''_{ij}, m''_{ij}, u''_{ij})$ است، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۳)

$$[l''_{ij}] = x_l \times (I - x_l)^{-1}$$
$$[m''_{ij}] = x_m \times (I - x_m)^{-1}$$
$$[u''_{ij}] = x_u \times (I - x_u)^{-1}$$

به‌عبارت‌دیگر، نخست معکوس ماتریس نرمال را محاسبه می‌شود. سپس آن را از ماتریس I کم می‌کنیم و در انتها ماتریس نرمال را در ماتریس حاصل ضرب می‌کنیم.

۵. محاسبه شاخص‌های D و R: میزان تأثیرگذاری عامل i بر سایر عوامل (جمع سطرها)، میزان تأثیرپذیری عامل i از سایر عوامل (جمع ستون‌ها):

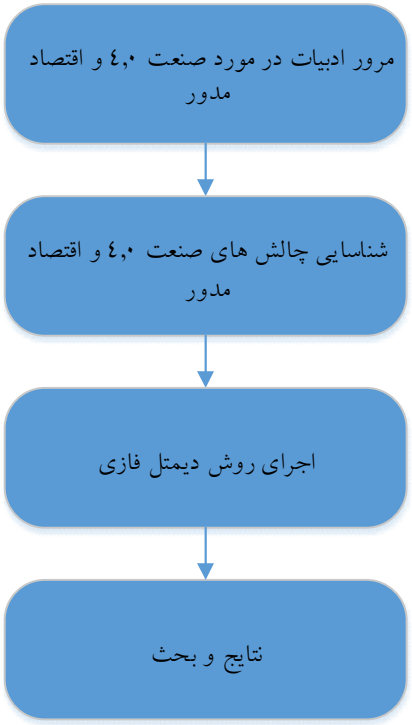
رابطه (٤)

$$D = \sum_{j=1}^{n} T_{ij}$$
$$R = \sum_{i=1}^{n} \tilde{T}_{ij}$$

سپس مقادیر D+R و D-R برای هر معیار محاسبه شدند. D+R: نشان‌دهنده میزان اهمیت کل عامل در سیستم (هم تأثیرگذاری و هم تأثیرپذیری). D-R: نشان‌دهنده نقش عامل به‌عنوان «علت» (اگر مثبت باشد) یا «معلول» (اگر منفی باشد).

٦. ترسیم نقشه علی– معلولی: درنهایت، با استفاده از مقادیر D+R (محور افقی) و D-R (محور عمودی)، نقشه علی– معلولی ترسیم شد.

شکل ۲ نشانگر چارچوب کلی و منطق اجرای مطالعه در راستای تحلیل علی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ در صنعت فولاد خوزستان است.



شکل ۲. مسیر پژوهش

همان‌طورکه اشاره شد، ابزار گردآوری داده‌ها، پرسش‌نامه مقایسات زوجی دیمتل فازی بود که شدت تأثیر هر معیار بر سایر معیارها را در مقیاس صفر تا چهار مشخص می‌کرد. پرسش‌نامه‌ها به‌صورت حضوری و برخط تکمیل و برای هر خبره یک ماتریس مستقل تشکیل شد. قبل از تجمیع، پاسخ‌ها از نظر کفایت و سازگاری بررسی شدند. در مرحله ادغام، از روش میانگین‌گیری اعداد فازی مثلثی برای تجمیع قضاوت‌ها و تشکیل ماتریس اولیه دیمتل استفاده شد.

در این پژوهش برای شناسایی و تحلیل روابط علّی میان ابعاد الگو مفهومی از نظرات خبرگان صنعت فولاد استفاده شد. ویژگی‌های کلی خبرگان در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. جدول مشخصات مصاحبه‌شوندگان

ردیف	تحصیلات	رشته/ تخصص	سابقه کاری (سال)
۱	کارشناسی‌ارشد مدیریت صنعتی	مدیر ارشد تولید و عملیات	۱۸
۲	کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع	مدیر واحد تولید	۱۵
۳	کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع	مدیر کیفیت	١٤
٤	کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع	کارشناس‌ارشد نگهداری و نت	۱۲
٥	کارشناسی‌ارشد مدیریت صنعتی	کارشناس‌ارشد نگهداری و نت	۱۱
٦	کارشناسی‌ارشد فناوری اطلاعات	کارشناس فناوری اطلاعات	۱۰
۷	کارشناسی‌ارشدIT	کارشناس شبکه و امنیت	۹
۸	دکتری مدیریت فناوری	عضو هیأت علمی (مدیریت فناوری)	۱۳
۹	دکتری مدیریت صنعتی	عضو هیأت علمی (مدیریت صنعتی)	۱۱
۱۰	کارشناسی‌ارشد مدیریت فناوری	مشاور صنعت فولاد	١٦

٤- یافته‌ها

٤-۱- شناسایی چالش‌های مؤثر بر پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/۰

پرسش این مرحله از پژوهش عبارت است از اینکه چالش‌های اصلی در مسیر پیاده‌سازی صنعت ٤/۰ و اقتصاد مدور در صنعت فولاد کدام‌اند؟ با انتخاب کلمه‌های کلیدی به بررسی متون مرتبط در بازه زمانی ۲۰۱٦ تا ۲۰۲۵ پرداخته شده است که درنهایت ۳۰ مقاله مورد تجزیه‌وتحلیل اطلاعات قرار گرفت. پژوهشگر به‌طور پیوسته منابع نهایی شده را برای دستیابی به چالش‌های مؤثر در پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/۰ بازنگری کرد و درنهایت ۳٦ چالش در ۱۰ بعد شناسایی شدند که در جدول ٤ مشاهده می‌شود.

جدول ٤. چالش‌های مؤثر در پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠

ابعاد	عوامل	منبع
منابع انسانی و مدیریت تغییر	ترس از تغییر و مقاومت کارکنان	(Haber & Carmeli, 2023) (Musova et al., 2025) (Cubric, 2020) (Bianco, 2021)
	ترس از انتقاد و نظارت	
	ترس از کاهش جایگاه شغلی	
	ترس از فناوری	
مهارت‌های فنی	نبود دانش تخصصی	(Harikannan & Vinodh, 2025) (Bianco, 2021) (Kumar & Kandpal, 2025)
	کمبود نیروی متخصص و واجد شرایط	
	نیاز به آموزش‌های پیشرفته	
	داده‌کاوی و کنترل اتوماسیون	
هزینه و بودجه	نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا	(Lestari et al., 2022) (Sahu, Agrawal, et al., 2023) (Sahu et al., 2022)
	کمبود سرمایه‌گذاری از سوی سرمایه‌گذران	
	وجودنداشتن قطعیت در بازگشت سرمایه	
	نیاز به نگهداری و ارتقای مستمر	
امنیت و حریم خصوصی	امنیت اطلاعات	(Wang et al., 2023) (Rosário & Dias, 2023)
	حاکمیت داده و خطرپذیری‌های مرتبط با حریم خصوصی	
	ضعف در سیاست‌های امنیتی	
توسعه فناوری	نبود داده استاندارد و انتقال فناوری	(Harikannan & Vinodh, 2025) (Li & Lao, 2025) (Ciano et al., 2025a) (Kumar et al., 2020)
	کمبود بهبود فناوری محصول	
	نبود زیرساخت‌های شبکه؛	
	کمبود فناوری‌های بازیافت	
	نبود فناوری حسگر	
پیچیدگی در یکپارچگی	کمبود آگاهی و کمبود اطلاعات درباره فناوری‌های نوین	(Harikannan & Vinodh, 2025) (Y. Khan et al., 2022) (Bendig & Charlet, 2025)
	کمبود همکاری و سازگاری	
	نبود شیوه‌نامه‌های به اشتراک‌گذاری داده	
کلان داده و تحلیل‌ها	چالش‌های ترکیب منابع مختلف داده	(Le, 2023) (Abdul-Hamid et al., 2020)
	پیچیدگی در یکپارچه‌سازی داده‌ها	
	تفاوت‌های گسترده در تفسیر عناصر داده	

ابعاد	عوامل	منبع
کمبود راهبرد	نبود حمایت مؤثر دولتی	(Sahu, Agrawal, et al., 2023) (Reim et al., 2025) (Mankata et al., 2025)
	ضعف رهبری و مدیریت	
	حمایت ناکافی از سوی مدیریت عالی	
	نبود برنامه‌ریزی برای پیاده‌سازی صنایع نوین و محیط تولیدی	
الگو مشارکتی	شکاف‌های زیرساختی	(Dorrego-Viera et al., 2025) (Reim et al., 2025) (Y. Khan et al., 2022)
	نبود سازگاری میان انسان و ماشین	
	کمبود چشم‌انداز	
آثار زیست‌محیطی	نبود قوانین و مقررات زیست‌محیطی	(Sahu, Agrawal, et al., 2023) (Theeraworawit et al., 2022) (Liu et al., 2025) (Harikannan & Vinodh, 2025) (Li & Lao, 2025)
	افزایش مصرف انرژی، کاهش منابع طبیعی	
	آلودگی و انباشت زباله‌های الکترونیکی	

به‌منظور اطمینان از کیفیت ابزار جمع‌آوری داده‌ها، روایی محتوای پرسش‌نامه دیمتل فازی با بهره‌گیری از نظر دو نفر از اعضای هیأت علمی متخصص در حوزه مدیریت فناوری و سیستم‌های تولید بررسی شد. براین‌اساس، مؤلفه‌ها از نظر جامعیت پوشش ابعاد، تناسب گویه‌ها با مفهوم نظری و شفافیت مقیاس‌های مقایسه‌ای با روایی مطلوب بودند.

علاوه‌براین برای بررسی کنترل کیفیت و یا به عبارت دیگر، پایایی الگو، از شاخص کاپا استفاده شد؛ به این روش که خبره دیگری بدون اطلاع از نحوه ادغام کدها و مفاهیم ایجاد شده به‌وسیله پژوهشگر، اقدام به گروه‌بندی مفاهیم می‌کند. سپس گروه‌های ارائه‌شده به‌وسیله پژوهشگر با گروه‌های ارائه شده به‌وسیله خبره مقایسه می‌شود. همان‌طورکه در جدول ۵ مشاهده می‌شود، پژوهشگر ۱۰ گروه و خبره دیگر ۱۲ گروه ایجاد کرده‌اند که از این تعداد، ۹ گروه مشترک هستند. براساس محاسبه‌های انجام شده، مقدار شاخص کاپا برابر است با ۰/٦٨٨٣٧ که با توجه به جدول ٦ در سطح توافق مناسب قرار گرفته است.

جدول ۵. نحوه محاسبه وضعیت تبدیل کدها به مفاهیم به‌وسیله پژوهشگر و فرد خبره

		نظر پژوهشگر		
		بله	خیر	مجموع کدگذار اول
نظر خبره	بله	A=۹	B=۱	۱۰
	خیر	C=۳	D=۰	۳
	مجموع کدگذار دوم	۱۲	۱	N=۱۳

توافق‌های مشاهده شده = $\frac{A+D}{N} = \frac{9}{13} = 0/6923$

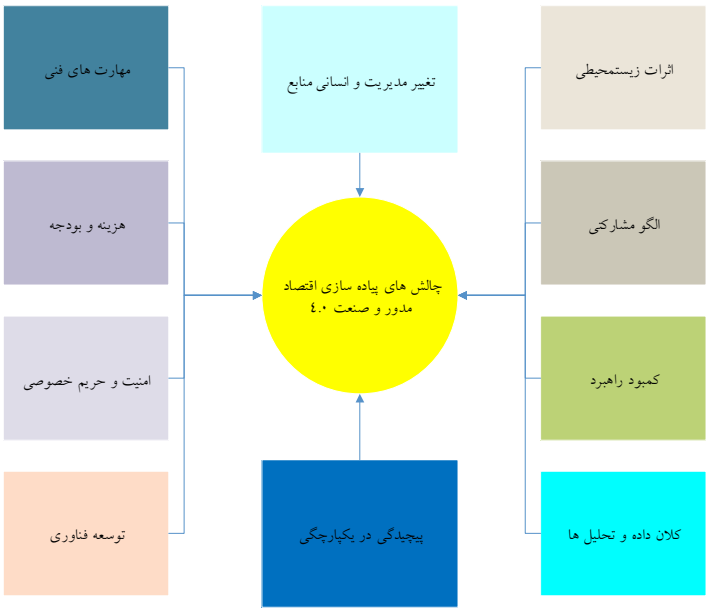
توافق‌های شانسی = $\frac{A+B}{N} \times \frac{A+C}{N} \times \frac{C+D}{N} \times \frac{B+D}{N} = \frac{10}{13} \times \frac{12}{13} \times \frac{3}{13} \times \frac{1}{13} = 0/0126046$

$K = \frac{\text{توافقات مشاهده شده} - \text{توافقات شانسی}}{1 - \text{توافقات شانسی}} = \frac{0/5384 - 0/01680}{1 - 0/01680} = ۰/۶۸۸۳۷$

جدول ٦. مقادیر قابل قبول شاخص کاپا

وضعیت توافق	مقدار عددی شاخص کاپا
ضعیف	کمتر از ۰
بی‌اهمیت	۰ - ۰/۲
متوسط	۰/۲۱ - ۰/٤۰
مناسب	۰/٤۱ - ۰/٦۰
* معتبر	۰/٦۱ - ۰/۸۰
* عالی	۰/۸۱ - ۱

بنابراین، ابعاد چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/۰ را می‌توان به صورت شکل ۳ ترسیم کرد (جدول ۳).



شکل ۳. چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ (یافته‌های پژوهشگر)

٤-۲- شناسایی روابط علت و معلولی چالش‌های مؤثر در پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠

در این پژوهش برای تعیین میزان تأثیرپذیری و تأثیرگذاری چالش‌ها از روش دیمتل فازی استفاده شده است. در آغاز ماتریس اولیه در اختیار ۱۰ نفر از خبرگان فعال در صنعت فولاد قرار گرفته شد و از آنان درخواست شد با مقایسه زوجی هریک از ابعاد و عوامل موجود شدت تأثیر عامل سطری بر ستون را بین ۰ تا ٤ رتبه‌بندی کنند. پس از جمع‌بندی و برآورد میانگین حسابی نظرات خبرگان ماتریس اولیه تشکیل شد که پس از نرمال‌سازی ماتریس روابط مستقیم به دست آمد (جدول ۷).

جدول ۷. ماتریس ارتباط مستقیم فازی

ابعاد	منابع انسانی و مدیریت تغییر	مهارت‌های فنی	هزینه و بودجه	امنیت و حریم خصوصی	توسعه فناوری
منابع انسانی و مدیریت تغییر	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)
مهارت‌های فنی	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۸۸,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)
هزینه و بودجه	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)
امنیت و حریم خصوصی	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)
توسعه فناوری	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰.۰۸۸,۰.۱۱۸,۰.۱۱۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)
پیچیدگی در یکپارچگی	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)
کلان داده و تحلیل‌ها	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۸۸,۰/۱۱۸,۰/۱۱۸)
کمبود راهبرد	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)
الگو مشارکتی	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)
آثار زیست‌محیطی	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)

ابعاد	پیچیدگی در یکپارچگی	کلان داده و تحلیل‌ها	کمبود راهبرد	الگو مشارکتی	آثار زیست‌محیطی
منابع انسانی و مدیریت تغییر	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)
مهارت‌های فنی	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)
هزینه و بودجه	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)
امنیت و حریم خصوصی	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)

ابعاد	پیچیدگی در یکپارچگی	کلان داده و تحلیل‌ها	کمبود راهبرد	الگو مشارکتی	آثار زیست‌محیطی
توسعه فناوری	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰.۰۸۸,۰.۱۱۸,۰.۱۱۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)
پیچیدگی در یکپارچگی	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)
کلان داده و تحلیل‌ها	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)
کمبود راهبرد	(۰.۰۵۹,۰.۰۸۸,۰.۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)
الگو مشارکتی	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)
آثار زیست‌محیطی	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۲۹,۰/۰۵۹,۰/۰۸۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۵۹,۰/۰۸۸,۰/۱۱۸)	(۰/۰۰۰,۰/۰۰۰,۰/۰۰۰)

سپس با توجه به رابطه ۲ ماتریس T فازی تشکیل می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، نخست معکوس ماتریس نرمال محاسبه شده و سپس از ماتریس I کم می‌شود و در انتها نیز ماتریس نرمال در ماتریس حاصل، ضرب می‌شود (جدول ۸).

جدول ۸. ماتریس ارتباط T فازی

ابعاد	منابع انسانی و مدیریت تغییر	مهارت‌های فنی	هزینه و بودجه	امنیت و حریم خصوصی	توسعه فناوری
منابع انسانی و مدیریت تغییر	(۰/۰۲٦,۰/۱۲۷,۰/۹۸۷)	(۰/۰۸٤,۰/۲۱۸,۱/۱۱۷)	(۰/۰۵۲,۰/۱۷۷,۱/۰۳۷)	(۰/۰٤۹,۱/۱۷۰,۱/۰۰۵)	(۰/۰٦۱,۰/۲۰۳,۱/۱۲۲)
مهارت‌های فنی	(۰/۰۸۷,۰/۲۲٦,۱/۱۵۰)	(۰/۰۳۸,۰/۱۵۸,۱/۰۷۳)	(۰/۰۸۵,۰/۲۱۹,۱/۱۱۷)	(۰/۰۵٦,۰/۱۸۷,۱/۰٦۰)	(۰/۱۲۳,۰/۲۷٤,۱/۲۰۷)
هزینه و بودجه	(۰/۰۵۵,۰/۱۸۳,۱/۰٦۹)	(۰/۰۸۵,۰/۲۱۹,۱/۱۱۸)	(۰/۰۲۵,۰/۱۲۲,۰/۹۵۷)	(۰/۰۵۰,۰/۱۷۱,۱/۰۰٦)	(۰/۰۸۹,۰/۲۲۹,۱/۱٤۷)
امنیت و حریم خصوصی	(۰/۰۵۱,۰/۱۷٦,۱/۰۳٦)	(۰/۰۵٦,۰/۱۸۷,۱/۰٦۱)	(۰/۰۵۰,۰/۱۷۱,۱/۰۰٦)	(۰/۰۲۱,۰/۱۱۱,۰/۸۹٦)	(۰/۰۸٦,۰/۲۲۲,۱/۱۱۲)
توسعه فناوری	(۰/۰۹۳,۰/۲٤۱,۱/۲۰۸)	(۰/۱۲۵,۰/۲۸۰,۱/۲۳۸)	(۰/۰۹۰,۰/۲۳٤,۱/۱۷٤)	(۰/۰۸۷,۰/۲۲۷,۱/۱۳۹)	(۰/۰۵۰,۰/۱۸۸,۱/۱٦٤)
پیچیدگی در یکپارچگی	(۰/۰۸۷,۰/۲۲۵,۱/۱۸۱)	(۰/۰۹۱,۰/۲۳۷,۱/۲۰۹)	(۰/۰۵۸,۰/۱۹۳,۱/۱۲۳)	(۰/۰۵۵.۰/۱۸٦,۱/۰۸۹)	(۰/۰۹۵,۰/۲٤۸,۱/۲۳۹)

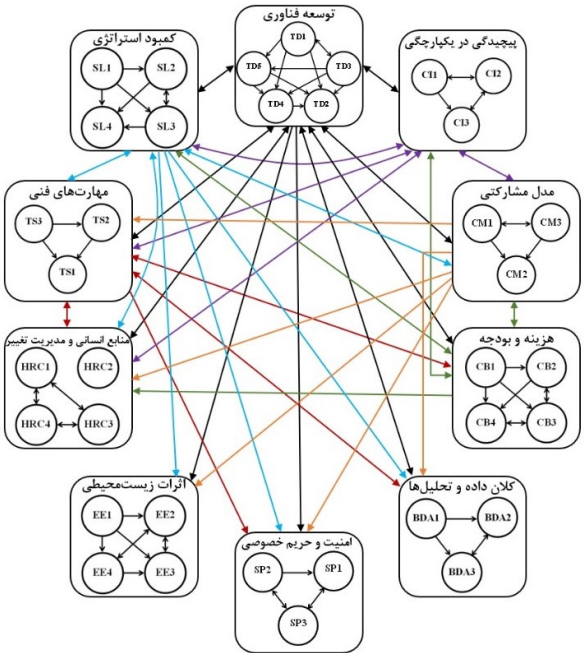
ابعاد	منابع انسانی و مدیریت تغییر	مهارت‌های فنی	هزینه و بودجه	امنیت و حریم خصوصی	توسعه فناوری
کلان داده و تحلیل‌ها	(۰/۰۵۹,۰/۱۹۵,۱/۰۹۷)	(۰/۰۹۱,۰/۲۳۳,۱/۱٤۸)	(۰/۰۵٦,۰/۱۸۸,۱/۰٦۵)	(۰/۰۸۲,۰/۲۰۸,۱/۰۵۷)	(۰/۱۲۱,۰/۲٦۹,۱/۱۷۷)
کمبود راهبرد	(۰/۰۸٦,۰/۲۲۳,۱/۱۷۷)	(۰/۰٦٤,۰/۲۱۰,۱/۱۸۱)	(۰/۰۸٤,۰/۲۱۷,۱/۱٤٤)	(۰/۰۵٤,۰/۱۸۵,۱/۰۸۵)	(۰/۰۹۳,۰/۲٤۵,۱/۲۳۵)
الگو مشارکتی	(۰/۰۵٤,۰/۱۸۱,۱/۰٦۵)	(۰/۰۵٦,۰/۱۹۱,۱/۰۹۰)	(۰/۰۵۱,۰/۱۷۵,۱/۰۳٤)	(۰/۰٤۹,۰/۱٦۹,۱/۰۰۲)	(۰/۰۵۹,۰/۲۰۱,۱/۱۱۸)
اثرات زیست‌محیطی	(۰/۰۵۱,۰/۱۷۵,۱/۰۳٤)	(۰/۰۵۳,۰/۱۸٤,۱/۰۵۸)	(۰/۰۵۰,۰/۱۷۰,۱/۰۰٤)	(۰/۰٤۷,۰/۱٦٤,۰/۹۷٤)	(۰/۰۵۷,۰/۱۹٤,۱/۰۸٦)
ابعاد	**پیچیدگی در یکپارچگی**	**کلان داده و تحلیل‌ها**	**کمبود راهبرد**	**الگو مشارکتی**	**آثار زیست‌محیطی**
منابع انسانی و مدیریت تغییر	(۰/۰۸۵,۰/۲۱۸,۱/۱٤۷)	(۰/۰۵۵,۰/۱۸۷,۱/۰٦٤)	(۰/۰۸۳,۰/۲۱۷,۱/۱٤٤)	(۰/۰۵۲,۰/۱۷٦,۱/۰۳۵)	(۰/۰٤۹,۰/۱۷۰,۱/۰۰٤)
مهارت‌های فنی	(۰/۰۹۲,۰/۲۳۷,۱/۲۰۹)	(۰/۰۹۱,۰/۲۳۳,۱/۱٤۷)	(۰/۰٦٤,۰/۲۱۰,۱/۱۸۱)	(۰/۰۵٦,۰/۱۹۱,۱/۰۹۰)	(۰/۰۵۳,۰/۱۸٤,۱/۰۵۸)
هزینه و بودجه	(۰/۰۵۸,۰/۱۹۳,۱/۱۲٤)	(۰/۰۵٦,۰/۱۸۸,۱/۰٦۵)	(۰/۰۸٤,۰/۲۱۷,۱/۱٤۵)	(۰/۰۵۱,۰/۱۷٦,۱/۰۳۵)	(۰/۰۵۰,۰/۱۷۰,۱/۰۰۵)
امنیت و حریم خصوصی	(۰/۰۵۵,۰/۱۸٦,۱/۰۹۰)	(۰/۰۸۲,۰/۲۰۸,۱/۰۵۷)	(۰/۰۵٤,۰/۱۸۵,۱/۰۸٦)	(۰/۰٤۹,۰/۱٦۹,۱/۰۰۳)	(۰/۰٤۷,۰/۱٦٤,۰/۹۷٤)
توسعه فناوری	(۰/۰۹۸,۰/۲۵٤,۱/۲۷۰)	(۰/۱۲۳,۰/۲۷٤,۱/۲۰۵)	(۰/۰۹۵,۰/۲۵۱,۱/۲٦٦)	(۰/۰٦۱,۰/۲۰٦,۱/۱٤٦)	(۰/۰۵۸,۰/۱۹۹,۱/۱۱۳)
پیچیدگی در یکپارچگی	(۰/۰۳۷,۰/۱۵٦,۱/۱۳۷)	(۰/۰۸۹,۰/۲۳۱,۱/۱۷۷)	(۰/۰۹۰,۰/۲۳۵,۱/۲۳۷)	(۰/۰۸۳,۰/۲۱۷,۱/۱٤٤)	(۰/۰۵۵,۰/۱۸۵,۱/۰۸۸)
کلان داده و تحلیل‌ها	(۰/۰۸۹,۰/۲۳۱,۱/۱۷۸)	(۰/۰۳٤,۰/۱٤۷,۱/۰۱۳)	(۰/۰٦۱,۰/۲۰٤,۱/۱۵۰)	(۰/۰۵٤,۰/۱۸٦,۱/۰٦۲)	(۰/۰۵۲,۰/۱۸۰,۱/۰۳۱)
کمبود راهبرد	(۰/۰۹۰,۰/۲۳۵,۱/۲۳۷)	(۰/۰٦۱,۰/۲۰۳,۱/۱٤۹)	(۰/۰۳٦,۰/۱۵٤,۱/۱۳۰)	(۰/۰۸٤,۰/۲۱۷,۱/۱٤۲)	(۰/۰۸۱,۰/۲۱۰,۱/۱۰۹)
الگو مشارکتی	(۰/۰۸۳,۰/۲۱۷,۱/۱٤٤)	(۰/۰۵٤,۰/۱۸٦,۱/۰٦۱)	(۰/۰۸٤,۰/۲۱۷,۱/۱٤۲)	(۰/۰۲٤,۰/۱۲۰,۰/۹۵۲)	(۰/۰۷۷,۰/۱۹٦,۱/۰۲۷)
اثرات زیست‌محیطی	(۰/۰۵۵,۰/۱۸۵,۱/۰۸۸)	(۰/۰۵۲,۰/۱۷۹,۱/۰۳۰)	(۰/۰۸۱,۰/۲۱۰,۱/۱۰۹)	(۰/۰۷۷,۰/۱۹٦,۱/۰۲۷)	(۰/۰۲۰,۰/۱۱۰,۰/۸۹۳)

در ادامه، D (جمع سطرها) و R (جمع ستون‌ها) محاسبه و با توجه به روش اپریکویک و زنگ از حالت فازی خارج شده و نتیجه به همراه D+R و D-R در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹. جدول محاسبه‌های D و R

ابعاد	$(Ri)^{def}$	$(Di)^{def}$	D+R	D-R
منابع انسانی و مدیریت تغییر	۲	۱/۹۳۲	۳/۹۳۱	-۰/۰٦۸
مهارت‌های فنی	۲/۱۲۸	۲/۰۸٤	٤/۲۱۲	-۰/۰٤٤
هزینه و بودجه	۱/۸٤۲	۲/۰۳	۳/۸۷۲	۰/۱۸۹
امنیت و حریم خصوصی	۱/۷٦٦	۱/٥۳۸	۳/۳۰۳	-۰/۲۲۷
توسعه فناوری	۲/۱۲٦	۲/۳۷۷	٤/٥۰٤	۰/۲٥۱
پیچیدگی در یکپارچگی	۲/۰۰۷	۲/۲۳	٤/۲۳۷	۰/۲۲۳
کلان داده و تحلیل‌ها	۱/۹	۱/۷	۳/٦	-۰/۲
کمبود راهبرد	۱/۸٤۲	۲/۳٤	٤/۱۸۲	۰/٤۹۸
الگو مشارکتی	۱/۹۱۲	۲/۱۳۲	٤/۰٤٤	۰/۲۲
آثار زیست‌محیطی	۱/۷٤۷	۰/۹۰٦	۲/٦٥۳	-۰/۸٤۱

همان‌طورکه در جدول ۹ دیده می‌شود؛ توسعه فناوری به‌عنوان بعد تأثیرگذار (علی) آثار زیست‌محیطی به‌عنوان تأثیرپذیرترین (معلول) بعد هستند. در شکل ٤ روابط علی و معلولی چالش‌ها دیده می‌شود.



شکل ٤. روابط علّی و معلولی بین چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠

به همین ترتیب برای چالش‌های هر بعد مقدار D، R، D+R و D-R در جدول ۱۰ محاسبه شده است. در معیار منابع انسانی و مدیریت تغییر، ترس از کاهش جایگاه شغلی تأثیرگذارترین و ترس از انتقاد و نظارت تأثیرپذیرترین چالش محسوب می‌شود. در معیار مهارت‌های فنی «نیاز به آموزش‌های پیشرفته» و «نبود دانش تخصصی»، در معیار هزینه و بودجه «نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا» و «نیاز به نگهداری و ارتقا مستمر»، در معیار امنیت و حریم خصوصی «امنیت اطلاعات» و «ضعف در سیاست‌های امنیتی»، در معیار توسعه فناوری «نبود زیرساخت‌های شبکه» و «کمبود فناوری‌های بهبود محصول»، در معیار پیچیدگی در یکپارچگی «کمبود آگاهی و کمبود اطلاعات درباره فناوری‌های نوین» و «نبود شیوه‌نامه‌های به اشتراک‌گذاری داده»، در معیار کلان داده و تحلیل‌ها «چالش‌های ترکیب منابع مختلف داده» و «تفاوت‌های گسترده در تفسیر عناصر داده»، در معیار کمبود راهبرد «نبود حمایت مؤثر دولتی» و «نبود برنامه‌ریزی برای پیاده‌سازی صنایع نوین و محیط تولیدی»، در معیار الگو مشارکتی

«شکاف‌های زیرساختی» و «نبود سازگاری میان انسان و ماشین» و درنهایت در معیار آثار زیست‌محیطی «نبود قوانین و مقررات زیست‌محیطی» و «کاهش منابع طبیعی» به‌ترتیب تأثیرگذارترین و تأثیرپذیرترین چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ شناسایی شدند.

جدول ۱۰. محاسبه D و R برای همه چالش‌ها

ابعاد	چالش‌ها	نماد	D	R	D+R	D-R
منابع انسانی و مدیریت تغییر	ترس از تغییر و مقاومت کارکنان	HRC1	۳/۰۳۹	۲/۸	۵/۸۳۹	۰/۲۳۹
	ترس از انتقاد و نظارت	HRC2	۱/٥٥٤	۲/۱۳۳	۳/٦۸۷	-۰/٥۷۹
	ترس از کاهش جایگاه شغلی	HRC3	۳/۲۰۹	۲/۹٦۷	٦/۱۷٦	۰/۲٤۲
	ترس از فناوری	HRC4	۳/۰٦۲	۲/۹٦٤	٦/۰۲٦	۰/۰۹۸
مهارت‌های فنی	نبود دانش تخصصی	TS1	٦/۰۳۹	۷/۰۰٤	۱۳/۰٤۳	-۰/۹٦٤
	کمبود نیروی متخصص و واجد شرایط	TS2	٦/۷۰۸	۷/۰۱	۱۳/۷۱۸	-۰/۳۰۲
	نیاز به آموزش‌های پیشرفته	TS3	۷/۲۹۹	٦/۰۳۲	۱۳/۳۳۱	۱/۲٦٦
هزینه و بودجه	نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا	CB1	۱/٦۸۸	۰/٥٥٥	۲/۲٤۲	۱/۱۳۳
	کمبود سرمایه‌گذاری از سوی سرمایه‌گذران	CB2	۱/٦۰۳	۱/۳۱۲	۲/۹۱٦	۰/۲۹۱
	نبود قطعیت در بازگشت سرمایه	CB3	۱/۰۹۳	۱/۸۰۳	۲/۸۹۷	-۰/۷۱
	نیاز به نگهداری و ارتقا مستمر	CB4	۰/٦۹۱	۱/٤۰٥	۲/۰۹٦	-۰.۷۱٤
امنیت و حریم خصوصی	امنیت اطلاعات	SP1	٤/٥٤۱	٤/۱۳۱	۸/٦۷۲	۰/٤۱
	حاکمیت داده و خطرپذیری‌های مرتبط با حریم خصوصی	SP2	٤/۲۰٦	٤/۳٤۲	۸/٥٤۸	-۰/۱۳۷
	ضعف در سیاست‌های امنیتی	SP3	۳/۸٦۱	٤/۱۳٤	۷/۹۹٦	-۰/۲۷۳
توسعه فناوری	نبود داده استاندارد و انتقال فناوری	TD1	۱/٥۷۲	۰/۹٥۲	۲/٥۲۳	۰/٦۲
	کمبود فناوری‌های بهبود محصول	TD2	۰/٤۷۲	۱/٥٥۸	۲/۰۲۹	-۱/۰۸٦
	نبود زیرساخت‌های شبکه	TD3	۱/٦٦	۰/۸۸۷	۲/٥٤۸	۰/۷۷۳
	کمبود فناوری‌های بازیافت	TD4	۰/٦٤۹	۱/۰٥	۱/۷	-۰/٤۰۱
	نبود فناوری حس‌گر	TD5	۰/۹۳۱	۰/۸۳٦	۱/۷٦۷	۰/۰۹٤

ابعاد	چالش‌ها	نماد	D	R	D+R	D-R
پیچیدگی در یکپارچگی	کمبود آگاهی و کمبود اطلاعات درباره فناوری‌های نوین	CI1	۵/۹۹۱	۵/٤۰۳	۱۱/۳۹٤	۰/۵۸۸
	کمبود همکاری و سازگاری	CI2	۵/۹۹۱	٦/۰۰۸	۱۲	-۰/۰۱۷
	نبود شیوه نامه‌های به اشتراک‌گذاری داده	CI3	۵/٤۳۵	٦/۰۰٦	۱۱/٤٤۱	-۰/۵۷۱
کلان داده و تحلیل‌ها	چالش‌های ترکیب منابع مختلف داده	BDA1	٦/٦۲	۵/۷۱۲	۱۲/۳۳٤	۰/۹۰۵
	پیچیدگی در یکپارچه‌سازی داده‌ها	BDA2	٦/۳۳۳	٦/٦۱۲	۱۲/۹٤٦	-۰/۲۷۹
	تفاوت‌های گسترده در تفسیر عناصر داده	BDA3	۵/۷۲۱	٦/۳٤۷	۱۲/۰٦۸	-۰/٦۲٦
کمبود راهبرد	نبود حمایت مؤثر دولتی	SL1	۱/٦٦٤	۱/۰۱٦	۲/٦۸	۰/٦٤۸
	ضعف رهبری و مدیریت	SL2	۱/٦٦٦	۱/۳۵٤	۳/۰۲	۰/۳۱۲
	حمایت ناکافی از سوی مدیریت عالی	SL3	۱/۵۰۷	۱/٤۸٤	۲/۹۹۱	۰/۰۲۳
	نبود برنامه‌ریزی برای پیاده‌سازی صنایع نوین و محیط تولیدی	SL4	۰/۸۵۷	۱/۸۳۹	۲/٦۹۷	-۰/۹۸۲
الگو مشارکتی	شکاف‌های زیرساختی	CM1	۷/٤۱٦	٦/۸۲۹	۱٤/۲٤۵	۰/۵۸۸
	نبود سازگاری میان انسان و ماشین	CM2	٦/۱۸۷	۷/۱٤۱	۱۳/۳۲۸	-۰/۹۵٤
	کمبود چشم‌انداز	CM3	٦/۸۰٦	٦/٤٤	۱۳/۲٤٦	۰/۳٦۷
آثار زیست‌محیطی	نبود قوانین و مقررات زیست‌محیطی	EE1	۲/۵۲۱	۱/٤۳۵	۳/۹۵٦	۱/۰۸٦
	افزایش مصرف انرژی	EE2	۲/٤۲٦	۲/۵٦۱	٤/۹۸۷	-۰/۱۳٦
	کاهش منابع طبیعی	EE3	۱/۹۲٤	۲/٤۷۵	٤/۳۹۹	-۰/۵۵۱
	آلودگی و انباشت زباله‌های الکترونیکی	EE4	۱/۹۲۳	۲/۳۲۲	٤/۲٤۵	-۰/٤

نتایج دیمتل فازی نشان داد که ابعاد «کمبود راهبرد»، «توسعه فناوری» و «پیچیدگی در یکپارچگی» بیشترین نقش علّی را در شکل‌گیری سایر چالش‌ها دارند. این یافته نشان می‌دهد که عواملی همچون نبود حمایت مؤثر دولتی، نبود داده استاندارد، کمبود آگاهی و اطلاعات

درباره فناوری‌های نوین می‌توانند هسته اصلی و آغازگر زنجیره چالش‌های مرتبط با استقرار اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ در صنعت فولاد باشند. تحلیل عمیق روابط نشان داد که ضعف در این سه بُعد، بر ابعاد منابع انسانی، امنیت اطلاعات، مهارت‌های فنی و حتی پیامدهای زیست‌محیطی اثر می‌گذارد.

این یافته با نتایج ساهو[1] و همکاران (۲۰۲۳) همسو است که نبود راهبرد مشخص و حمایت دولتی، مهم‌ترین مانع گذار به اقتصاد مدور معرفی می‌کنند. همچنین دورگو- ویرا[2] و همکاران (۲۰۲۵) نیز بیان می‌کنند که توسعه فناوری و وجود قابلیت‌های یکپارچه‌سازی، شرط نخست تحقق الگوهای مدور و اکوسیستمی در صنایع تولیدی است؛ موضوعی که در صنعت فولاد خوزستان نیز مشاهده و نشان داده شد. علاوه‌بر موارد بالا باید ابعاد توسعه فناوری، کمبود راهبرد و پیچیدگی در یکپارچگی را در اولویت قرار داد. بعد «کمبود راهبرد» در این مطالعه اثرگذاری چشمگیری بر سایر ابعاد داشته است، به‌گونه‌ای‌که نبود حمایت دولتی و عدم برنامه‌ریزی برای صنایع نوین بر هزینه، توسعه فناوری و حتی انگیزش کارکنان اثر گذاشته است. این یافته نیز با نتایج ریم[3] و همکاران (۲۰۲۵) و موسووا و موسی[4] (۲۰۲۵) هم‌خوانی دارد که راهبردهای کلان و حمایت نهادی را پیش‌نیاز اقتصاد مدور می‌دانند. لو[5] و همکاران (۲۰۲٤) بیان می‌کنند موفقیت صنعت ٤/٠ و اقتصاد مدور در صنایع سنگین بیشتر به کیفیت شبکه وابسته است و پژوهش حاضر نشان داد که علاوه‌بر کیفیت شبکه، نبود زیرساخت شبکه و کمبود استانداردهای داده، نقش کلیدی در موفقیت پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ داشته‌اند. خان[6] و همکاران (۲۰۲۲) نیز ضعف زیرساخت‌های فناوری را عامل تشدید مقاومت کارکنان و کاهش پذیرش فناوری معرفی می‌کنند؛ موضوعی که در نتایج این پژوهش نیز تأیید و عنوان شد علاوه‌بر موارد بالا در حوزه منابع انسانی ترس از تغییر و مقاومت کارکنان، ترس از انتقاد و نظارت، ترس از کاهش جایگاه شغلی و ترس از فناوری بیشترین تأثیر را در عدم پذیرش فناوری داشتند. کوبریک [7] و بیانکو[1] (۲۰۲۰و۲۰۲۱) نیز بیان می‌کنند ترس ناشی از

1. Sahu et al
2. Dorrego-Viera et al
3. Reim et al
4. Musova & Musa
5. Lu et al
6. Khan et al
7. Cubric

تغییر فناوری، قوی‌ترین مانع پیاده‌سازی سیستم‌های دیجیتال هستند. ازسوی‌دیگر، یافته‌های مادگیل[2] و همکاران (۲۰۲۲) بر ضرورت آموزش‌های پیشرفته تأکید دارد درحالی‌که نتایج این مطالعه نشان می‌دهد علاوه‌بر نیاز به آموزش‌های پیشرفته، نبود دانش تخصصی و کمبود نیروی متخصص و واجد شرایط نیز به‌عنوان یکی از محورهای چالشی پروژه‌های دیجیتال و اقتصاد مدور مطرح است. در بعد «امنیت و حریم خصوصی»، امنیت اطلاعات، ضعف سیاست‌های امنیتی و حاکمیت داده و خطرپذیری‌های مرتبط با حریم خصوصی مانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ بود. ژنگ[3] و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیان کرده‌اند که نبود چارچوب امنیتی قوی، مانع پذیرش فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین و اینترنت اشیا می‌شود؛ بنابراین یافته‌های پژوهش حاضر با ادبیات جهانی به‌طور کامل همسو است. درنهایت، قرارگیری «آثار زیست‌محیطی» در ناحیه کاملاً معلول نشان می‌دهد که پیامدهای زیست‌محیطی در صنعت فولاد از سایر ابعاد ریشه می‌گیرند. نتایج ما مشابه مطالعه لیو[4] (۲۰۲۵) است که نشان داد چالش‌های زیست‌محیطی در صنایع سنگین، نتیجه مستقیم ضعف در راهبرد، فناوری و یکپارچگی داده است نه یک عامل مستقل. به‌طورکلی، مقایسه نتایج این پژوهش با ادبیات پیشین نشان می‌دهد که الگوی استخراج شده به‌طور کامل با ساختارهای نظری مطرح در مطالعات جهانی هم‌خوانی دارد و می‌تواند مبنایی معتبر برای برنامه‌ریزی تحول دیجیتال و مدور در صنعت فولاد کشور باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در صنایع معاصر، پیوند میان «اقتصاد مدور» و «صنعت ٤/٠» نقشی راهبردی در مسیر گذار به توسعه پایدار دارد. این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل چالش‌های پیاده‌سازی این دو رویکرد در شرکت فولاد خوزستان انجام شد. در گام نخست، طی مرور نظام‌مند منابع، ۳٦ عامل در ده بُعد اصلی شناسایی گردید و سپس با بهره‌گیری از روش دیمتل فازی روابط علّی میان آنها تبیین شد. نتایج دلالت دارد که ابعاد «کمبود راهبرد»، «توسعه فناوری» و «پیچیدگی در

1. Bianco
2. Modgil et al
3. Zheng et al
4. Liu

یکپارچگی» بیش‌ترین نقش علّی را در ساختار چالش‌ها ایفا می‌کنند و به‌عنوان پایه‌ای‌ترین محرک‌های تحول دیجیتال محسوب می‌شوند. در بعد منابع انسانی و مدیریت تغییر، ترس از کاهش جایگاه شغلی عامل تأثیرگذار و ترس از انتقاد و نظارت عامل اثرپذیر شناخته شد. این یافته نشان می‌دهد ایجاد فرهنگ سازمانی مبتنی بر اعتماد و شفاف بودن، پیش‌شرط پذیرش فناوری‌های نوین است. بنابراین، بازطراحی برنامه‌های توانمندسازی کارکنان و استفاده از سیاست‌های انگیزشی باید در اولویت قرار گیرد. در بعد مهارت‌های فنی، نیاز به آموزش‌های پیشرفته در زمینه داده‌کاوی و کنترل خودکار عامل محرک اصلی و نبود دانش تخصصی عامل اثرپذیر بود. این نتیجه بیانگر آن است که گسترش آموزش‌های تخصصی و استفاده از نیروهای چند مهارتی می‌تواند به‌طور مستقیم بر شتاب تحولات فناورانه تأثیر بگذارد. در بعد هزینه و بودجه، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا قوی‌ترین عامل تأثیرگذار و نیاز به نگهداری و ارتقای مستمر بیش‌ترین اثرپذیری را داشت. صنعت فولاد برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمند، سامانه‌های جمع‌آوری داده و زیرساخت‌های اینترنت اشیا به سرمایه‌گذاری اولیه سنگین نیاز دارد؛ اما در صورت برنامه‌ریزی دقیق مالی و استفاده از سیاست‌های تسهیلگر دولتی، این هزینه به فرصت رقابتی بلندمدت تبدیل می‌شود. در بعد امنیت و حریم خصوصی، امنیت اطلاعات عامل محرک و ضعف در سیاست‌های امنیتی عامل اثرپذیر شناسایی شد. تضمین امنیت داده‌ها در فناوری‌های دیجیتال نه‌تنها اعتماد صاحبان منفعت را افزایش می‌دهد بلکه پذیرش فناوری‌های نو را تسریع می‌کند. بنابراین، تدوین سیاست‌های رسمی امنیت سایبری و تعیین مسئولیت‌های مشخص برای حفاظت داده ضروری است. در بعد توسعه فناوری، نبود زیرساخت‌های شبکه‌ای پایدار به‌عنوان عامل محرک اصلی و کمبود فناوری‌های بهبود محصول عامل اثرپذیر شناسایی شد. این نتایج نشان‌دهنده ضرورت برنامه‌ریزی برای سرمایه‌گذاری در شبکه‌های ارتباطی، نوسازی زیرساخت صنعتی و بهره‌گیری از فناوری‌های نسل جدید تولید است. در بعد پیچیدگی در یکپارچگی، کمبود آگاهی از فناوری‌های نوین بیش‌ترین اثرگذاری و نبود شیوه نامه‌های اشتراک داده بیش‌ترین اثرپذیری را داشت. درنتیجه، ایجاد چارچوب‌های یکپارچه تبادل داده و آموزش مستمر در سطح بین‌بخشی ضروری است تا همکاری میان بخش‌های مختلف سازمان آسان شود. در بعد کلان داده و تحلیل‌ها، ترکیب منابع مختلف داده، قوی‌ترین چالش محرک بود درحالی‌که تفاوت تفسیر داده‌ها بیش‌ترین اثرپذیری را داشت.

برای رفع این مشکل، پیاده‌سازی استانداردهای مشترک در جمع‌آوری، پالایش و تحلیل داده‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تصمیم‌گیری هوشمند در صنعت ٤/٠ بدون کیفیت داده قابل اتکا امکان‌پذیر نیست. در بعد کمبود راهبرد، نبود حمایت مؤثر دولتی عامل تأثیرگذار اصلی و نبود برنامه‌ریزی در پیاده‌سازی صنایع نوین عامل اثرپذیر شناسایی شد. بنابراین، نقش سیاست‌گذاری کلان و حمایت نهادی در ایجاد بسترهای مالی، قانونی و آموزشی غیرقابل انکار است. دولت‌ها می‌توانند از راه مشوق‌های مالیاتی و تسهیلات توسعه فناوری، راه را برای ورود صنایع سنتی به مسیر اقتصاد مدور هموار کنند. در بعد الگو مشارکتی، شکاف‌های زیرساختی عامل محرک و نبود سازگاری میان انسان و ماشین عامل اثرپذیر بود. تعامل مؤثر بین نیروی انسانی و فناوری نیازمند تکامل زیرساخت فنی و فرهنگ همکاری دیجیتال است. آموزش مهارت‌های ترکیبی (انسان – ماشین) و توسعه سکوهای هوشمند مشارکتی، راهکار اصلی رفع این شکاف است. در بعد آثار زیست‌محیطی، نبود قوانین و مقررات زیست‌محیطی به‌عنوان عامل تأثیرگذار و کاهش منابع طبیعی عامل اثرپذیر شناخته شد. اعمال مقررات سخت‌گیرانه، نهادینه‌سازی استانداردهای سبز و توسعه فناوری‌های باززاینده می‌تواند آثار منفی زیست‌محیطی صنایع فولاد را به‌میزان چشمگیری کاهش دهد. نتیجه کلی تحلیل دیمتل فازی نشان داد سه بُعد «کمبود راهبرد»، «توسعه فناوری» و «پیچیدگی در یکپارچگی» اثرگذاری بین‌بعدی مثبت دارند و به‌عنوان نقاط اهرمی بر سایر چالش‌ها تأثیر مستقیم می‌گذارند. دستیابی به موفقیت پایدار نیازمند تمرکز مدیریتی بر این سه محور است؛ زیرا بهبود آنها می‌تواند اثر دومینویی بر سایر ابعاد ایجاد کند. از طرف دیگر، توجه به ابعاد اثرپذیر مانند مهارت‌های فنی، الگو مشارکتی و آثار زیست‌محیطی باید در قالب راهبردهای حمایتی و حفاظتی دنبال شود. از منظر مدیریتی، پیشنهاد می‌شود فولاد خوزستان و صنایع مشابه: راهبرد تحول دیجیتال مبتنی بر حمایت دولتی و هم‌افزایی سیاست‌های زیست‌محیطی تدوین کنند؛ نقشه توانمندسازی کارکنان و زیرساخت‌های فناورانه را هم‌زمان توسعه دهند؛ چارچوب استاندارد اشتراک داده و مدیریت امنیت اطلاعات را در سطح بین سازمانی مستقر سازند؛ برنامه ارزیابی و پایش زیست‌محیطی را نیز برای سنجش اثر اجرای فناوری‌ها ایجاد کنند.

٦- محدودیت‌ها و پیشنهادها

این پژوهش نیز همانند سایر پژوهش‌ها با محدودیت‌هایی مواجه بود. نخست آنکه از محدودیت‌های پژوهش حاضر، تمرکز تحلیل بر یک صنعت خاص است. در چنین رویکردهایی، تعمیم آماری هدف اصلی نیست بلکه تمرکز بر تولید بینش‌های قابل انتقال به صنایع با شرایط مشابه است. ازاین‌رو، یافته‌های این پژوهش می‌توانند با درنظرگرفتن ویژگی‌های ساختاری، محیط رقابتی و شرایط رقابتی مشابه در صنایع دیگر نیز به‌کار گرفته شوند. داده‌های پژوهش مبتنی بر دیدگاه و قضاوت جمعی خبرگان بوده است و هرچند روش دیمتل فازی امکان تحلیل روابط علّی پیچیده را فراهم می‌آورند، اما همواره احتمال وجود سوگیری‌های ذهنی ناشی از تجربه‌ها و اولویت شخصی پاسخ‌دهندگان وجود دارد. بااین‌حال، انتخاب خبرگان از سطوح مختلف مدیریتی و فنی به‌منظور ارتقای اعتبار نتایج و کاهش این اثر در طراحی پژوهش لحاظ شد. برای پژوهش‌های آینده، استفاده از داده‌های صنایع مختلف، رویکردهای ترکیبی مانند AHP-DEMATEL و بررسی اثر متقابل شاخص‌های پایداری پیشنهاد می‌شود. به‌این‌ترتیب، درک جامع‌تری از پیوند میان اقتصاد مدور و صنعت ٤/٠ در سطوح منطقه‌ای و ملی حاصل خواهد شد.

۷- منابع

Abdul-Hamid, A.-Q., Ali, M. H., Tseng, M.-L., Lan, S., & Kumar, M. (2020). Impeding challenges on industry 4.0 in circular economy: Palm oil industry in Malaysia. *Computers & Operations Research*, *123*, 105052. https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105052

Ahmad, K., Islam, M. S., Jahin, M. A., & Mridha, M. F. (2024). Analysis of Internet of things implementation barriers in the cold supply chain: An integrated ISM-MICMAC and DEMATEL approach. *Plos one*, *19*(7), e0304118. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304118

Bashynska, I., & Prokopenko, O. (2024). Leveraging artificial intelligence for circular economy: transforming resource management, supply chains, and manufacturing practices. *Scientific Journal of Bielsko-Biala School of Finance and Law*, *28*(2), 85-91. https://doi.org/10.19192/wsfip.v28i2.11

Bendig, D., & Charlet, M. (2025). Opportunities and challenges of blockchain for multi-sided platforms. *Electronic Markets*, *35*(1), 25. https://doi.org/10.1007/s12525-024-00742-8

Bianco, M. (2021). *Overcoming the social barriers of AI adoption* Eindhoven University of Technology Eindhoven, The Netherlands]. https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/186591024/Bianco_M.pdf

Ciano, M. P., Peron, M., Panza, L., & Pozzi, R. (2025a). Industry 4.0 technologies in support of circular Economy: A 10R-based integration framework. *Computers & Industrial Engineering*, *201*, 110867. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110867

Ciano, M. P., Peron, M., Panza, L., & Pozzi, R. (2025b). Industry 4.0 technologies in support of circular Economy: A 10R-based integration framework. *Computers & Industrial Engineering*, 110867. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110867

Cubric, M. (2020). Drivers, barriers and social considerations for AI adoption in business and management: A tertiary study. *Technology in Society*, *62*, 101257. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101257

Dorrego-Viera, J. I., Urbinati, A., & Lazzarotti, V. (2025). Transition towards circular economy: Exploiting open innovation for circular product development. *Journal of Innovation & Knowledge*, *10*(2), 100668. https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100668

Haber, L., & Carmeli, A. (2023). Leading the challenges of implementing new technologies in organizations. *Technology in Society*, *74*, 102300. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102300

Harikannan, N., & Vinodh, S. (2025). State of art review on sustainable manufacturing and Industry 4.0. *Business Strategy and the Environment*, *34*(1), 872-913. https://doi.org/10.1002/bse.3934

Khan, S., Singh, R., Sá, J. C., Santos, G., & Ferreira, L. P. (2022). Modelling of Determinants of logistics 4.0 adoption: insights from developing countries. *Machines*, *10*(12), 1242. https://doi.org/10.3390/machines10121242

Khan, Y., Su'ud, M. B. M., Alam, M. M., Ahmad, S. F., Ahmad, A. Y. B., & Khan, N. (2022). Application of internet of things (IoT) in sustainable supply chain management. *Sustainability*, *15*(1), 694. https://doi.org/10.3390/su15010694

Kumar, R., & Kandpal, V. (2025). Factors affecting the adoption of industry 4.0 technologies in circular economy: interpretive structure modelling (ISM) approach for future sustainability. *Discover Sustainability*, *6*(1), 351. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00438-x

Kumar, R., Singh, R., & Dwivedi, Y. (2020). Application of Industry 4.0 technologies in Indian SMEs for sustainable growth: Analysis of

challenges. *Journal of Cleaner Production*, *257*(124063), 1-13. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124063

Le, T. T. (2023). Linking big data, sustainable supply chain management and corporate performance: the moderating role of circular economy thinking. *The international journal of logistics management*, *34*(3), 744-771. https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2022-0074

Lestari, E. D., Hamid, N. A., Rizkalla, N., Purnamaningsih, P., & Urus, S. B. T. (2022). The Effect of Financial Literacy, Cost of Technology Adoption, Technology Perceived Usefulness, and Government Support on MSMEs' Business Resilience. *Global Journal of Business Social Sciences Review (GATR-GJBSSR)*, *10*(3). https://doi.org/10.35609/gjbssr.2022.10.3(1)

Li, C., & Lao, W. (2025). Internet of Things' sustainability effects: quantile and temporal insights. *Humanities and Social Sciences Communications*, *12*(1), 1-22. https://doi.org/10.1057/s41599-024-03521-4

Liu, Y., Usman, M., Akbar, A., & Hedvicakova, M. (2025). From Linear to Circular: Assessing the Influence of Circular Economy Practices on Business and Environmental Dynamics. *Polish Journal of Environmental Studies*, *34*(1). https://doi.org/10.15244/pjoes/190842

Lu, H., Zhao, G., & Liu, S. (2024). Integrating circular economy and Industry 4.0 for sustainable supply chain management: a dynamic capability view. *Production Planning & Control*, *35*(2), 170-186. https://doi.org/10.1080/09537287.2022.2056285

Mankata, L. M., Antwi-Afari, P., & Ng, S. T. (2025). A blockchain-based supply chain framework for advancing circular economy in the construction industry. *Journal of Cleaner Production*, *519*, 145966. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145966

Modgil, S., Gupta, S., Stekelorum, R., & Laguir, I. (2022). AI technologies and their impact on supply chain resilience during COVID-19. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *52*(2), 130-149. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2020-0434

Musova, Z., Musa, H., & Rech, F. (2025). Circular economy challenges: a bibliometric exploration of cognitive and behavioral barriers. *Journal of Organizational Change Management*. https://doi.org/10.1108/JOCM-06-2024-0309

Pilipenets, O., Gunawardena, T., Hui, F. K. P., Mendis, P., & Aye, L. (2025). A novel circular economy framework: Assessing process circularity through resource flow and emissions analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, *215*, 108083. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108083

Reim, W., Tabares, S., & Parida, V. (2025). Small and Medium-Sized Enterprises and the Circular Economy: Leveraging Ecosystem Strategies for Circular Business Model Implementation. *Organization & Environment*, 10860266251325247. https://doi.org/10.1177/10860266251325247

Rosário, A. T., & Dias, J. C. (2023). How has data-driven marketing evolved: Challenges and opportunities with emerging technologies. *International Journal of Information Management Data Insights*, *3*(2), 100203. https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2023.100203

Sahu, A., Agrawal, S., & Kumar, G. (2022). Integrating Industry 4.0 and circular economy: a review. *Journal of Enterprise Information Management*, *35*(3), 885-917. https://doi.org/10.1108/JEIM-12-2020-0504

Sahu, A., Agrawal, S., & Kumar, G. (2023). Challenges of implementing industry 4.0 in achieving sustainable development goals: a case of Indian manufacturing organization. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *45*(3), 8125-8139. https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2230626

Sahu, A., Khandelwal, N., & Bhatia, A. (2023). Critical success factors of industry 4.0 and circular economy to achieve green economy and sustainable development goals: A dematel approach. *Korea Review of International Studies Approach*, *16*(9), 100-108. https://www.universalai.in/wp-content/uploads/2020/03/KRI160859.pdf

Singh, R., Joshi, A., Dissanayake, H., Iddagoda, A., Khan, S., Félix, M. J., & Santos, G. (2025). Integrating Industry 4.0, Circular Economy, and Green HRM: A Framework for Sustainable Transformation. *Sustainability*, *17*(7), 3082. https://doi.org/10.3390/su17073082

Theeraworawit, M., Suriyankietkaew, S., & Hallinger, P. (2022). Sustainable supply chain management in a circular economy: A bibliometric review. *Sustainability*, *14*(15), 9304. https://doi.org/10.3390/su14159304

Wang, X., Zhang, J., Ma, D., & Sun, H. (2023). Green agricultural products supply chain subsidy scheme with green traceability and data-driven marketing of the platform. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(4), 3056. https://doi.org/10.3390/ijerph20043056

Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.-N., Chen, W., Chen, X., Weng, J., & Imran, M. (2020). An overview on smart contracts: Challenges, advances and platforms. *Future Generation Computer Systems*, *105*, 475-491. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.12.019