ارزیابی فناوری‌های موجود در صنعت زیست‌فناوری بر مبنای ابعاد انقلاب صنعتی پنجم

زهرا سادات بیات[۱]، زهرا سعیدی مبارکه[۲*] ،احسان مومنی[۳] ،حسین عموزاد خلیلی[۴]

[۱] گروه مدیریت، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران، Zahrasadat.bayat@iau.ac.ir

[۲] گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، z.saeidimobarakeh@iau.ac.ir

[۳] گروه مهندسی صنایع، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، ایران، ehs_momeni@iau.ac.ir

[۴] گروه مهندسی صنایع، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران، ho.amoozad@iau.ac.ir

10.22034/jtd.2026.2087254.2062

چکیده

امروزه توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های نوین به یکی از عوامل کلیدی در تحول صنایع پیشرفته تبدیل شده است، به‌ویژه در صنعت زیست‌فناوری که نقشی اساسی در حوزه‌هایی مانند سلامت، کشاورزی و محیط‌زیست ایفا می‌کند. هم‌زمان با شکل‌گیری انقلاب صنعتی پنجم و تأکید آن بر همگرایی فناوری‌های پیشرفته با رویکردی انسان‌محور و پایدار، ضرورت شناسایی و ارزیابی فناوری‌های موجود در این صنعت بیش از پیش اهمیت یافته است. بدین منظور، در ابتدا شاخص‌های و گزینه‌های مساله تحقیق با توجه به ادبیات تحقیق و نظر کارشناسان شناسایی شد. سپس، وزن معیارها با استفاده از روش فوکام فازی محاسبه و نتایج نشان‌دهنده اهمیت بالای معیارهای در دسترس بودن فناوری، انعطاف‌پذیری، موارد مالی، ایمنی، سطح اتوماسیون، قابلیت بازیابی ظرفیت و میزان آلایندگی بود. در ادامه، رتبه-بندی گزینه‌ها با استفاده از رویکرد تاپسیس فازی انجام شد که گزینه‌های سنتز DNA با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی و نیز پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه به عنوان مهمترین گزینه‌ها معرفی شدند. ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی از طریق مقایسه با سایر روش‌ها موجود در ادبیات تحقیق، حاکی از پایایی و اعتبار بالای نتایج بود. یافته‌های پژوهش می‌تواند راهنمای مؤثری برای مدیران و سیاست‌گذاران باشد تا با شناخت دقیق‌تر از فناوری‌های کلیدی، مسیر توسعه و سرمایه‌گذاری در صنعت زیست‌فناوری را هدفمند و کارآمد هدایت کنند.

کلمات کلیدی: صنعت زیست‌فناوری، انقلاب صنعتی پنجم، فوکام فازی، تاپسیس فازی.

۱. مقدمه

تولیدکنندگان امروزی با تقاضای فزاینده برای تنوع محصولات و الزامات غیرقابل پیش‌بینی بازار مواجه‌اند. در چنین شرایطی، همگام شدن با پویایی‌های بازار، ارتقای کیفیت محصولات و دستیابی به بهره‌وری بالاتر مستلزم پذیرش و به‌کارگیری فناوری‌های نوین تولید است [۱]. طی دهه‌های گذشته، فناوری‌های تولید نقشی اساسی در شکل‌دهی به رقابت‌پذیری و پایداری بنگاه‌های صنعتی و سازمان‌های تولیدی ایفا کرده‌اند. این فناوری‌ها با هدف افزایش کارایی، بهبود کیفیت محصول، کاهش هزینه‌ها، مدیریت ریسک و تسریع زمان عرضه به بازار توسعه یافته و امروزه به یکی از محرک‌های اصلی رشد اقتصادی و نوآوری صنعتی تبدیل شده‌اند [۲]. با این حال، انتخاب فناوری تولید مناسب به دلیل تنوع گسترده گزینه‌های موجود، فرایندی پیچیده و چالش‌برانگیز است. در واقع، تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب و

پیاده‌سازی فناوری‌های تولید، تأثیر مستقیمی بر ساختار زنجیره ارزش، الگوی مصرف منابع، سطح بهره‌وری و توان پاسخ‌گویی سازمان به تغییرات بازار دارد [۳]. با پیچیده‌تر شدن محیط‌های صنعتی و افزایش سطح عدم قطعیت، ارزیابی و انتخاب فناوری‌های تولید از یک فعالیت صرفاً فنی فراتر رفته و به یک تصمیم راهبردی، چندبعدی و تعیین‌کننده برای رشد، سودآوری و بقای سازمان‌ها تبدیل شده است [۴]؛ تصمیمی که مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان جنبه‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و انسانی و ایجاد توازن میان آن‌هاست. از سوی دیگر، در دهه‌های اخیر، پیچیدگی و نوسانات فزاینده در زنجیره‌های تأمین جهانی، ماهیت رقابت‌پذیری و پایداری سازمان‌ها را به‌طور چشمگیری تغییر داده است [۵]. رویدادهایی نظیر همه‌گیری کووید-۱۹، بحران‌های ژئوپلیتیکی و بی‌ثباتی‌های اقتصادی، آسیب‌پذیری‌های عمیق مدل‌های سنتی مدیریت زنجیره تأمین را آشکار ساخته‌اند. این مدل‌ها که عمدتاً بر کارایی و حداقل‌سازی هزینه‌ها تمرکز داشتند، در مواجهه با شوک‌ها و اختلالات گسترده، توان محدودی در حفظ تداوم و تاب‌آوری عملیاتی از خود نشان داده‌اند [۶]. افزون بر این، چالش‌هایی همچون تغییرات اقلیمی، محدودیت منابع طبیعی و افزایش انتظارات اجتماعی و اخلاقی از سازمان‌ها، ضرورت بازنگری اساسی در رویکردهای تولید و مدیریت زنجیره تأمین را دوچندان کرده است [۷]. در این راستا، مفهوم انقلاب صنعتی پنجم به‌عنوان نسل جدیدی از تحول صنعتی مطرح شده است که هدف آن فراتر رفتن از رویکرد فناورمحور انقلاب صنعتی چهارم و تأکید بر اصول انسان‌محوری، پایداری و تاب‌آوری سازمانی است [۸]. در حالی که انقلاب صنعتی چهارم عمدتاً بر دیجیتالی‌سازی، اتوماسیون و هوش مصنوعی استوار بود، انقلاب صنعتی پنجم بر تعامل سازنده و متوازن میان انسان و فناوری تمرکز دارد تا فناوری در خدمت رفاه انسانی، مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی و توسعه پایدار قرار گیرد [۹]. با این وجود، گذار از انقلاب صنعتی چهارم به پنجم برای بسیاری از سازمان‌ها فرآیندی دشوار و چندلایه محسوب می‌شود. تحقق موفق این گذار صرفاً به استقرار فناوری‌های پیشرفته محدود نمی‌شود، بلکه نیازمند تحول در ساختارها، ارزش‌ها و فرهنگ سازمانی است تا مفاهیمی چون پایداری، تاب‌آوری و نوآوری به‌صورت درونی در فرآیندهای تولید و زنجیره تأمین نهادینه شوند [۱۰]. اهمیت این موضوع در صنعت زیست‌فناوری بیش از بسیاری از صنایع دیگر نمایان است؛ زیرا فناوری‌های زیستی به‌طور مستقیم با سلامت انسان، امنیت غذایی، حفاظت از محیط‌زیست و کیفیت زندگی جوامع در ارتباط هستند. از این رو، ارزیابی و انتخاب فناوری‌های مورد استفاده در این صنعت نمی‌تواند صرفاً بر مبنای شاخص‌های سنتی نظیر هزینه، سرعت یا بهره‌وری انجام شود. در چارچوب انقلاب صنعتی پنجم، فناوری‌های زیست‌فناوری باید علاوه بر کارایی فنی و اقتصادی، از منظر انسان‌محوری، ایمنی، پایداری زیست‌محیطی، تاب‌آوری در برابر اختلالات و قابلیت تعامل با فناوری‌های دیجیتال نیز مورد ارزیابی قرار گیرند. چنین رویکردی موجب می‌شود تصمیم‌گیرندگان بتوانند فناوری‌هایی را انتخاب کنند که ضمن ارتقای عملکرد سازمانی، بیشترین هم‌سویی را با اهداف توسعه پایدار و الزامات نسل جدید تحولات صنعتی داشته باشند. بنابراین، ارزیابی فناوری‌های صنعت زیست‌فناوری بر اساس ابعاد انقلاب صنعتی پنجم می‌تواند مبنایی علمی برای هدایت سرمایه‌گذاری‌ها، سیاست‌گذاری‌های فناورانه و توسعه پایدار این صنعت فراهم سازد. بررسی این موضوع می‌تواند ضمن ارائه چشم‌اندازی نو برای مدیریت آینده زنجیره‌های تأمین، به تقویت رقابت‌پذیری و مشروعیت بلندمدت سازمان‌ها نیز کمک کند [۱۱]. بر این اساس، ارزیابی فناوری‌های تولید در عصر جدید باید علاوه بر کارایی فنی و اقتصادی، میزان هم‌راستایی آن‌ها با اصول انسان‌محوری و پایداری اجتماعی را نیز مدنظر قرار دهد. با وجود اهمیت روزافزون این رویکردها، مطالعات پیشین غالباً ارزیابی فناوری‌های تولید را از دیدگاه‌های محدود یا تک‌بعدی بررسی کرده‌اند و کمبود یک چارچوب جامع که بتواند معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و انسانی را به‌صورت یکپارچه و در شرایط عدم قطعیت تحلیل کند، به‌وضوح احساس می‌شود. از آنجا که بسیاری از متغیرهای تصمیم‌گیری در این حوزه ماهیتی کیفی، ذهنی و زبانی دارند، استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی می‌تواند ابزار مناسبی برای مدل‌سازی واقع‌گرایانه این پیچیدگی‌ها فراهم آورد. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر شناسایی و ارزیابی فناوری‌های تولید در صنعت زیست‌فناوری بر مبنای ابعاد انقلاب صنعتی پنجم است. بدین منظور، ابتدا با بهره‌گیری از مرور ادبیات و نظرات خبرگان، معیارها و فناوری‌های بالقوه شناسایی شده و داده‌های مربوط به عملکرد آن‌ها گردآوری می‌شود. سپس وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها با استفاده از رویکرد فوکام فازی انجام گرفته و در نهایت، رتبه‌بندی فناوری‌های تولید با به‌کارگیری روش تاپسیس فازی صورت می‌پذیرد. نوآوری اصلی این پژوهش در کاربرد چارچوب تصمیم‌گیری در حوزه فناوری‌های نوین زیست‌فناوری است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر ارزیابی فناوری‌ها در صنایع تولیدی یا سایر حوزه‌های فناوری تمرکز داشته‌اند، این پژوهش به ارزیابی و اولویت‌بندی فناوری‌های نوین سنتز DNA در صنعت زیست‌فناوری می‌پردازد. وجه تمایز دیگر پژوهش، انجام این ارزیابی بر مبنای ابعاد انقلاب صنعتی پنجم، شامل انسان‌محوری، پایداری، تاب‌آوری و هم‌افزایی انسان و فناوری است؛ به‌گونه‌ای که چارچوب پیشنهادی می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران صنعت زیست‌فناوری در انتخاب و سرمایه‌گذاری بر فناوری‌های نوظهور کمک کند.

با توجه به اهمیت روزافزون فناوری‌های نوین سنتز DNA در توسعه صنعت زیست‌فناوری، این پژوهش در پی پاسخ به این سؤال است که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تجاری‌سازی فناوری‌های نوین سنتز DNA کدام‌اند و هر یک از این عوامل چه میزان بر موفقیت تجاری این

فناوری‌ها تأثیر دارند؟ در این پژوهش، منظور از فناوری‌های نوین زیست‌فناوری، فناوری‌های مرتبط با سنتز DNA است و تمرکز مطالعه بر چهار فناوری شامل سنتز DNA با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک، سنتز DNA بر پایه سیلیکون، پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه و سنتز DNA با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی قرار دارد. این چهار فناوری به دلیل بلوغ فناوری، کاربرد گسترده در صنعت، قابلیت تجاری‌سازی، و نقش مؤثر آن‌ها در افزایش سرعت، دقت و کیفیت فرآیند سنتز ژن به‌عنوان نمایندگان نسل جدید فناوری‌های سنتز DNA انتخاب شده‌اند.

۲. ادبیات نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش، در ابتدا به طور مختصر به معرفی انقلاب صنعتی پنجم و ابعاد آن پرداخته و سپس برخی از مهمترین پژوهش‌های نزدیک به موضوع تحقیق مرور می‌شود.

۱،۲. انقلاب صنعتی پنجم

انقلاب صنعتی پنجم رویکردی نوینی است که توسط کمیسیون اروپا در سال ۲۰۲۱ با هدف گذار از تمرکز صرف بر فناوری و اولویت‌بخشی به دغدغه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی معرفی شد. این مفهوم نه به‌عنوان جایگزین، بلکه به‌عنوان تکاملی بر انقلاب صنعتی چهارم تعریف می‌شود که می‌کوشد الزامات زیست‌محیطی و نیازهای انسانی را در کانون استراتژی‌های صنعتی قرار دهد [12]. انقلاب صنعتی پنجم بر ارکان بنیادین "انسان‌محوری"، "پایداری"، "تاب‌آوری" و "دیجیتالی‌سازی" استوار است [13]. در این چارچوب، پیشرفت‌های فنی در خدمت ارتقای نیروی کار انسانی و حفاظت از محیط‌زیست قرار می‌گیرند تا از طریق هم‌افزایی میان انسان و ماشین، سازمان‌هایی تاب‌آور و همسو با اهداف توسعه پایدار شکل بگیرند [14]. در ادامه به معرفی هر یک از این ابعاد پرداخته می‌شود.

۱،۱،۲. پایداری

در چارچوب انقلاب صنعتی پنجم، "پایداری" فراتر از رشد اقتصادی صرف، بر تعادل میان سه رکن اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی استوار است [15]. این نگرش مستلزم آن است که بنگاه‌های اقتصادی ضمن خلق ارزش، پیامدهای مخرب فعالیت‌های خود را بر جامعه و محیط‌زیست به حداقل برسانند [16]. در بعد عملیاتی، این مفهوم با مدیریت بهینه منابع و کنترل پسماند در تمامی مراحل زنجیره تأمین همراه است ضمن حفظ توان بازسازی اکوسیستم‌ها [17]، رفاه، ایمنی و کرامت انسانی نیز تضمین گردد. امروزه به دلیل مطالبه‌گری فزاینده مصرف‌کنندگان و سهامداران، پایداری به یک ضرورت استراتژیک برای حفظ رقابت‌پذیری بدل شده است [18]. از همین رو، پایداری در انقلاب صنعتی پنجم به عنوان یکی از ارکان بنیادین، پیش‌شرط دستیابی به الگوهای تولیدی مسئولانه‌ای است که منافع اقتصادی را با الزامات بلندمدت زیست‌محیطی و اجتماعی همسو می‌سازد.

۲،۱،۲. تاب‌آوری

در ادبیات زنجیره تأمین، "تاب‌آوری" فراتر از ایستادگی صرف در برابر وقفه‌ها، به معنای ظرفیت سیستم برای بازیابی و ارتقای عملکرد در مواجهه با شرایط بحرانی است [19]. این مفهوم نه به معنای تحمل منفعلانه شرایط، بلکه نشان‌دهنده قابلیتی پویا برای واکنش سریع و سازگاری هوشمندانه در زمان وقوع اختلالات است [20]. در این چارچوب، تاب‌آوری شامل طیفی از واکنش‌هاست که از "بازگشت به وضعیت عادی" [۲۱] تا "تحول به وضعیتی مطلوب‌تر" و بهره‌برداری از فرصت‌های ناشی از شرایط جدید را در بر می‌گیرد [۲۲]. در واقع، زنجیره‌های تأمین تاب‌آور با تکیه بر انعطاف‌پذیری ذاتی و محافظت از زیرساخت‌های حیاتی، قادرند در مواجهه با انواع ریسک‌ها و شوک‌های پیش‌بینی‌نشده، استمرار وظایف عملیاتی خود را تضمین کنند [۲۳]. به همین دلیل، امروزه تاب‌آوری به‌عنوان یک حوزه میان‌رشته‌ای، نقشی محوری در طراحی نظام‌های تولیدی نوآورانه و مقاوم در فضای انقلاب صنعتی پنجم ایفا می‌کند [۱۳].

۳،۱،۲. انسان‌محوری

اصل "انسان‌محوری" به‌عنوان یکی از ارکان اصلی انقلاب صنعتی پنجم، نیازها و رفاه نیروی کار را در کانون فرایندهای تولید قرار می‌دهد. این رویکرد در تضاد با مدل‌های پیشین است که عمدتاً بر ماشین‌محوری و بهره‌وری اقتصادی بدون توجه کافی به پیامدهای انسانی و زیست‌محیطی استوار بودند [۲۴]. در این چارچوب، فناوری‌های پیشرفته‌ای همچون ربات‌های مشارکتی، هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، نه برای جایگزینی نیروی کار، بلکه برای تقویت هوش و نبوغ انسانی به کار گرفته می‌شوند. این هم‌افزایی میان انسان و ماشین، علاوه بر تسهیل شخصی‌سازیِ محصولات، از حقوق و توانمندی‌های کارکنان حفاظت می‌کند. در نهایت، انقلاب صنعتی پنجم با بازگرداندن جایگاه واقعی انسان به چرخه تولید، فراتر از مفهوم تولید هوشمند، در پی احیای نقش محوری نیروی انسانی در صنعت است [۲۵].

۴،۱،۲. دیجیتالی‌سازی

دیجیتالی‌سازی به عنوان یکی از ارکان اصلی انقلاب صنعتی پنجم، نقش مهمی در ایجاد سیستم‌های تولیدی هوشمند، انعطاف‌پذیر و انسان‌محور ایفا می‌کند. در حالی که انقلاب صنعتی چهارم عمدتاً بر خودکارسازی و بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال تمرکز داشت، در انقلاب صنعتی پنجم، دیجیتالی‌سازی در راستای تقویت همکاری میان انسان و ماشین، افزایش پایداری و ارتقای رفاه انسانی به کار گرفته می‌شود. فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، کلان‌داده و دوقلوی دیجیتال با فراهم‌سازی امکان تحلیل داده‌ها در زمان واقعی، بهبود تصمیم‌گیری، شخصی‌سازی تولید و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های صنعتی را امکان‌پذیر می‌سازند. از این رو، دیجیتالی‌سازی نه تنها محرکی برای افزایش بهره‌وری است، بلکه بستری برای تحقق اهداف انسانی و پایدار در انقلاب صنعتی پنجم محسوب می‌شود.

۲،۲. پیشینه تحقیق

تولیدکنندگان امروزی در مواجهه با تغییرات سریع بازارهای جهانی و تنوع تقاضا با چالش‌های فراوان روبه‌رو هستند. دستیابی به رشد پایدار مستلزم بهره‌گیری از فناوری‌های نوین است، اما تنوع گزینه‌ها انتخاب فناوری مناسب را به تصمیمی راهبردی تبدیل کرده است [۲۶]. از سوی دیگر، پیشرفت‌های اخیر در زیست‌فناوری به شدت به فناوری‌های جدید تولیدی متکی بوده است. ازاین‌رو، در این بخش در ابتدا به مروری بر مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با استفاده از فناوری‌های تولید مختلف در صنعت بیفناوری و در ادامه به ارزیابی فناوری‌های مورد استفاده در سایر صنایع پرداخته می‌شود. سومان و همکاران [۲۷]، نقش روش‌های آماری پیشرفته و رویکردهای بهینه‌سازی در ارتقای فناوری‌های تولید صنعت زیست‌فناوری را بررسی کردند. در این مطالعه، تکنیک‌هایی مانند طراحی آزمایش‌ها، کنترل فرایند آماری، یادگیری ماشین و تحلیل کلان‌داده‌ها برای پایش دقیق فرایندها به‌کار گرفته شدند. نتایج نشان می‌دهد استفاده از این ابزارها موجب بهبود کارایی، کاهش تغییرپذیری و تضمین کیفیت محصولات زیستی می‌شود. گادیار و همکاران [۲۸]، توسعه خودران فرایندهای پرفیوژن برای تولید آنتی‌بادی مونوکلونال را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با استفاده از رویکردهای پیشرفته، می‌توان بهینه‌سازی خودکار و سریع‌تر فرایندهای تولید را حاصل کرد که منجر به افزایش بازدهی و کیفیت محصولات بیولوژیکی می‌شود. این فناوری پتانسیل بالایی در تسریع و کارآمدسازی تولید داروهای بیولوژیکی دارد. اشمیت و همکاران [۲۹]، به بررسی کاربرد و توجیه اقتصادی دوقلوهای دیجیتال در تولید زیست‌دارویی پرداختند و با ارائه یک نمای کلی از بازار، فناوری‌ها و ذی‌نفعان این حوزه، نقش آن را در تحول دیجیتال تولید بررسی کردند. نتایج نشان داد دوقلوهای دیجیتال با بهبود پایش فرایندها، تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی تولید می‌توانند کارایی و انعطاف‌پذیری در تولید زیست‌داروها را افزایش دهند. همچنین این فناوری ظرفیت بالایی برای افزایش کیفیت محصول و کاهش هزینه‌های عملیاتی در آینده دارد. میراخوری و نیازی [۳۰]، از منظر دیدگاه نظارتی، به بررسی بهره‌برداری از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین (AI/ML[1]) در فرآیندهای کشف، توسعه و به‌ویژه فناوری تولید محصولات دارویی و بیولوژیکی پرداختند. نتایج نشان داد که AI/ML پتانسیل تسریع قابل توجهی در شناسایی داروها و بهینه‌سازی فناوری تولید، مانند کنترل فرایند و تضمین کیفیت، دارد. با این حال، این مطالعه بر ضرورت وجود چارچوب‌های نظارتی شفاف و سازگار برای تضمین ایمنی، اثربخشی و انطباق فناوری‌های تولید مبتنی بر AI/ML با استانداردها تأکید می‌کند. ساتیاپریان و همکاران [۳۱]، به بررسی وضعیت فعلی فناوری تحلیل فرایند (PAT[2]) در مراحل پایین‌دستی تولید زیست‌داروها پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از ابزارهای پیشرفته تحلیلی و پایش بلادرنگ می‌تواند کنترل فرایند، کیفیت محصول و کارایی تولید را بهبود دهد. این پژوهش همچنین بر نقش PAT در بهینه‌سازی فرایندهای پایین‌دستی و حرکت به‌سوی تولید هوشمند زیست‌دارو تأکید داشت. مهتا و همکاران [۳۲]، نقش محوری هوش مصنوعی را در تحول فناوری‌های تولید صنعت زیست‌فناوری بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که به‌کارگیری هوش مصنوعی در حوزه‌هایی نظیر زیست‌پردازش، اتوماسیون و مدیریت زنجیره تأمین، از طریق بهینه‌سازی فرآیندها و نگهداری پیش‌بینانه، به محرکی کلیدی برای رشد آتی این صنعت تبدیل شده است. لیچی [۳۳]، به توسعه سیستم‌های پایش و کنترل برای فرایندهای زیست‌فناوریکی پرداخت. نتایج نشان داد که طراحی سیستم‌های پایش و کنترل مؤثر، نقش حیاتی در بهبود کیفیت محصول، افزایش بهره‌وری، و اطمینان از تکرارپذیری و قابلیت اطمینان فرایندهای زیست‌فناوریکی دارد. این سیستم‌ها با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های بلادرنگ، امکان تصمیم‌گیری بهتر و مدیریت بهینه فرایند را فراهم می‌کنند. شان و همکاران [۳۴]، به بررسی کاربرد فناوری‌های تک‌سلولی در میکروبیولوژی محیطی پرداخته‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد

---

[1] Artificial Intelligence/machine learning

[2] process analytical technology

که روش‌های تک‌سلولی امکان شناسایی دقیق تنوع میکروبی، بررسی عملکرد سلول‌ها و درک بهتر تعاملات میکروبی در محیط را فراهم می‌کنند. نتایج این پژوهش بر اهمیت این فناوری‌ها در پیشرفت مطالعات میکروبی و زیست‌فناوری تأکید دارد. کالکل و همکاران [۳۵]، بر نقش تحول‌آفرین چاپ سه‌بعدی در صنعت زیست‌فناوری تأکید دارند. این فناوری با قابلیت‌هایی نظیر ساخت سریع و سفارشی‌سازی، امکان تولید تجهیزات زیستی پوشیدنی را فراهم کرده و نقشی کلیدی در توسعه محصولات این حوزه و ارتقای کاربردهای سلامت ایفا می‌کند. شاهروبودین و همکاران [۳۶]، با استفاده از مصاحبه‌های عمیق، چالش‌های به‌کارگیری فناوری چاپ سه‌بعدی به‌عنوان یکی از فناوری‌های تولید پیشرفته در تولید محصولات زیست‌پزشکی شرکت‌های مالزیایی را بررسی کردند. یافته‌ها ۱۲ چالش فنی مانند محدودیت مواد، دقت ابعادی پایین و ضعف خواص مکانیکی، و نیز ۶ چالش مدیریتی از جمله آموزش کارکنان، قیمت‌گذاری و مسائل امنیت سایبری را شناسایی کرد. نتایج نشان داد توسعه مؤثر این فناوری در صنعت زیست‌پزشکی نیازمند رفع هم‌زمان موانع فنی و مدیریتی است.

ایلدیریم و آییلدیز [۳۷]، مناسب‌ترین فناوری چاپ سه‌بعدی برای تولید سفارشی را با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی بررسی کردند. وزن معیارها با BWM[۳]تعیین و گزینه‌ها با[۴]FF-WASPAS رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد فناوری[۵]SLA بهترین گزینه بوده و دقت و کیفیت سطح مهم‌ترین معیارها هستند. آنوسسورنیتیسام و همکاران [۳۸]، چارچوبی برای انتخاب فناوری تولید با مقایسه قالب‌گیری تزریقی و تولید افزایشی مبتنی بر[۶]FDM ارائه کردند. وزن معیارهای پایداری با BWM تعیین و گزینه‌ها با TOPSIS فازی رتبه‌بندی شد. نتایج نشان داد اولویت معیارها میان ذینفعان متفاوت است و تحلیل حساسیت پایداری نتایج را تأیید کرد. سینگ و همکاران [۳۹]، با بهره‌گیری از هوش مصنوعی به‌عنوان سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری، به انتخاب فناوری بهینه برای تولید خودروهای انرژی نو پرداختند. این پژوهش با مدل‌سازی مسئله در قالب یک طبقه‌بندی چندکلاسه، عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین را ارزیابی کرد؛ نتایج نشان داد که الگوریتم CatBoost بالاترین دقت و رگرسیون لجستیک تعادل عملکردی مطلوب‌تری را در این انتخاب ارائه می‌دهند. هیپرت و همکاران [۴۰]، چارچوبی چندمعیاره برای انتخاب ربات‌های صنعتی و مشارکتی در تولید هوشمند توسعه دادند. این رویکرد با تلفیق روش‌های PROMETHEE و Mudge، معیارهایی نظیر کارایی، ایمنی و انعطاف‌پذیری را برای بهینه‌سازی فرایند تصمیم‌گیری به‌کار می‌گیرد. هدف اصلی این چارچوب، افزایش شفافیت، کاهش زمان برنامه‌ریزی و ارتقای رقابت‌پذیری در محیط‌های تولیدی است. رانی و همکاران [۴۱]، با تمرکز بر ارزیابی فناوری‌های تولید هوشمند در شرکت‌های کوچک و متوسط، رویکردی ترکیبی را برای حل مسائل پیچیده تصمیم‌گیری چندمعیاره ارائه دادند. آن‌ها با بهره‌گیری از اطلاعات فازی تصویری (PFI[۷]) و مدل CODAS[۸]، چارچوبی طراحی کردند که قادر است دیدگاه‌های کارشناسان را از طریق تلفیق وزن‌دهی عینی (SPC[۹]) و ذهنی (RANCOM[۱۰]) و با استفاده از عملگرهای PFSWWG[۱۱] یکپارچه کند. لی و لی [۴۲]، با تحلیل شرکت‌های کوچک و متوسط ویتنام، نشان دادند که فناوری‌های تولید هوشمند از طریق میانجی‌گری تولید ناب و تعدیل‌گری تولید سبز، عملکرد پایدار شرکت‌ها را ارتقا می‌دهند. این پژوهش بر ضرورت یکپارچه‌سازی هم‌افزایانه فناوری‌های هوشمند با رویکردهای سبز و ناب برای تضمین رقابت‌پذیری در اقتصادهای نوظهور تأکید دارد. گلدانی و ایشیزاکا [۴۳]، فناوری‌های تصفیه پسماندهای بهداشتی در یک مرکز درمانی ایران را با BWM فازی برای وزن‌دهی معیارها و MULTIMOORA فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها ارزیابی کردند. بوزیچ و همکاران [۴۴]، فناوری‌های خودران برای لجستیک پایدار در صنعت شیرینی‌سازی را با مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی شامل[۱۲]SAPEVO-M،[۱۳]FAHP و[۱۴]FCOBRA ارزیابی

---

[3] best–worst method
[4] Fermatean Fuzzy Weighted Aggregated Sum Product Assessment
[5] Stereolithography
[6] fused deposition modeling
[7] picture fuzzy information
[8] combinative distance-based assessment
[9] symmetry point of criteria
[10] ranking comparison
[11] picture fuzzy Sugeno-Weber-weighted geometric
[12] Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors Group Decision Making
[13] Fuzzy Analytic Hierarchy Process
[14] Fuzzy COmprehensive distance Based Ranking

کردند. نتایج مطالعه موردی نشان داد سیستم AGV[15] بهترین گزینه بوده و و موجب کاهش هزینه‌ها و انتشار CO_2 و بهبود کارایی انبار می‌شود. کشان و تاناکا [۴۵]، پایدارترین فناوری تولید هیدروژن را با FAHP و استفاده از بوت‌استرپ برای افزایش اعتبار نتایج ارزیابی کردند. نتایج نشان داد الکترولیز فتوولتائیک مناسب‌ترین گزینه برای تولید هیدروژن پایدار است. حسینی دهشیری و همکاران [۴۶]، فناوری‌های تولید هیدروژن در ایران را با چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی شامل SWARA فازی برای وزن‌دهی و WASPAS فازی برای رتبه‌بندی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد الکترولیز مبتنی بر انرژی خورشیدی و بادی بالاترین اولویت را دارند. پور و همکاران [۴۷]، فناوری‌های تولید صنعت ۴,۰ را با FAHP برای تعیین وزن معیارها و FTOPSIS جهت اولویت‌بندی گزینه‌ها ارزیابی کردند. نتایج نشان داد سیستم‌های سایبری–فیزیکی، کلان‌داده و ربات‌های مستقل برترین گزینه‌ها هستند. آبالای و همکاران [۴۸]، مدلی برای انتخاب فناوری‌های تولید صنعت ۴,۰ ارائه کردند. در این پژوهش وزن عوامل با ترکیب FAHP و FANP تعیین شد. عبدالله و همکاران [۴۹]، تأثیر فناوری‌های صنعت ۴,۰ بر استراتژی‌های تولید را بررسی کردند. وزن‌دهی معیارها با AHP و رتبه‌بندی فناوری‌ها با TOPSIS فازی انجام شد. نتایج نشان داد هزینه مهم‌ترین معیار و تولید افزایشی مناسب‌ترین فناوری است. بهاتیا و دیاز الساید [۵۰]، فناوری‌های تولید هوشمند در شرکت‌های کوچک و متوسط را با یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره ارزیابی کردند. رتبه‌بندی گزینه‌ها با TOPSIS فازی و بر اساس ۱۱ معیار انجام شد. مالاگا و وینود [۵۱]، فناوری‌های صنعت ۴,۰ در تولید افزایشی را برای تسریع عرضه محصولات سفارشی بررسی کردند. وزن‌دهی معیارها با FAHP و اولویت‌بندی فناوری‌ها با FVIKOR انجام شد. وانگ و همکاران [۵۲]، فناوری‌های هوشمند در تولید پایدار در شرایط اضطراری را بررسی کردند. تحلیل روابط معیارها با SF DEMATEL[16] و اولویت‌بندی فناوری‌ها با R-SF CoCoSo[17] انجام شد. نتایج نشان داد قابلیت اطمینان، هزینه و بلوغ فناوری مهم‌ترین معیارها هستند. مدیچ و همکاران [۵۳]، کاربرد فناوری‌های دیجیتال پیشرفته در تولید در چارچوب صنعت ۴,۰ را بررسی کردند. وزن معیارها با FAHP و ارزیابی فناوری‌ها با PROMETHEE انجام شد. نتایج نشان داد برنامه‌ریزی تولید، تبادل دیجیتال داده و سیستم‌های کنترل تولید مهم‌ترین عوامل هستند. بویوکوزکان و گوچر [۵۴]، انتخاب فناوری چاپ سه‌بعدی را بررسی کردند. روش CODAS[18] فازی فیثاغورثی برای ارزیابی به‌کار رفت. نتایج نشان داد مدل، فناوری مناسب متناسب با نیاز زنجیره تأمین را به‌طور پایدار شناسایی می‌کند.

۴,۲. شکاف تحقیق

با وجود گسترش پژوهش‌ها در حوزه فناوری‌های نوظهور و توسعه صنعت زیست‌فناوری، بسیاری از مطالعات پیشین عمدتاً بر کاربردها و پیشرفت‌های فناورانه یا فناوری‌های مرتبط با انقلاب صنعتی چهارم تمرکز داشته‌اند و کمتر به شناسایی و ارزیابی فناوری‌های این صنعت در چارچوب مفهومی انقلاب صنعتی پنجم پرداخته‌اند. در حالی که مفاهیمی مانند انسان‌محوری، هم‌زیستی انسان و فناوری و پایداری از مؤلفه‌های اساسی انقلاب صنعتی پنجم به شمار می‌روند، این ابعاد به‌صورت نظام‌مند در ارزیابی فناوری‌های زیستی مورد توجه قرار نگرفته‌اند. از سوی دیگر، بخش زیادی از پژوهش‌ها به تحلیل روندهای فناورانه یا ارائه چارچوب‌های مفهومی محدود شده و مدل‌های کاربردی برای ارزیابی و اولویت‌بندی فناوری‌ها در سطح راهبردی کمتر توسعه یافته است. علاوه بر این، ماهیت پیچیده و پژوهش‌محور صنعت زیست‌فناوری موجب شده تصمیم‌گیری در این حوزه با عدم‌قطعیت‌های قابل توجهی همراه باشد، در حالی که بسیاری از روش‌های مورد استفاده در مطالعات پیشین مبتنی بر رویکردهای قطعی بوده و توانایی کافی برای لحاظ کردن این شرایط را ندارند. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی می‌تواند امکان مدل‌سازی دقیق‌تر عدم‌قطعیت‌ها و ابهام در قضاوت خبرگان را فراهم سازد. با وجود گسترش پژوهش‌ها در حوزه فناوری‌های نوظهور و توسعه صنعت زیست‌فناوری، بسیاری از مطالعات پیشین عمدتاً بر کاربردها و پیشرفت‌های فناورانه یا فناوری‌های مرتبط با انقلاب صنعتی چهارم تمرکز داشته‌اند و کمتر به شناسایی و ارزیابی فناوری‌های این صنعت در چارچوب مفهومی انقلاب صنعتی پنجم پرداخته‌اند. از سوی دیگر، بخش زیادی از پژوهش‌ها به تحلیل روندهای فناورانه یا ارائه چارچوب‌های مفهومی محدود شده و مدل‌های کاربردی برای ارزیابی و اولویت‌بندی فناوری‌ها در سطح راهبردی کمتر توسعه یافته‌اند. علاوه بر این، ماهیت پیچیده و پژوهش‌محور صنعت زیست‌فناوری موجب شده تصمیم‌گیری در این حوزه با عدم

---

[15] Automated Guided Vehicle system
[16] spherical fuzzy decision-making trial and evaluation laboratory
[17] spherical fuzzy regret theory-based combined compromise solution
[18] Combinative Distance-Based Assessment

قطعیت‌های قابل‌توجهی همراه باشد، در حالی که بسیاری از روش‌های مورد استفاده در مطالعات پیشین مبتنی بر رویکردهای قطعی بوده و توانایی کافی برای لحاظ کردن این شرایط را ندارند. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی می‌تواند امکان مدل‌سازی دقیق‌تر عدم قطعیت‌ها و ابهام در قضاوت خبرگان را فراهم سازد. بر این اساس، تا آنجا که بررسی ادبیات این پژوهش نشان می‌دهد، مطالعه‌ای که به‌طور مشخص به شناسایی و ارزیابی فناوری‌های صنعت زیست‌فناوری بر مبنای ابعاد انقلاب صنعتی پنجم و با بهره‌گیری از یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی بپردازد، گزارش نشده است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب یکپارچه، درصدد کاهش این خلأ پژوهشی و گسترش ادبیات موجود است.

۳. روش تحقیق

۳-۱- روش‌های مورد استفاده و علت انتخاب آنها

در این پژوهش، روش فوکام فازی برای تعیین وزن معیارها و روش تاپسیس فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها انتخاب شد. انتخاب این دو روش بر مبنای ویژگی‌های مسئله تحقیق و مقایسه آن‌ها با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره صورت گرفت. در بخش وزن‌دهی، اگرچه روش‌هایی نظیر AHP فازی و BWM فازی از جمله رویکردهای پرکاربرد محسوب می‌شوند، اما AHP نیازمند تعداد زیادی مقایسه زوجی بوده و با افزایش تعداد معیارها احتمال ناسازگاری در قضاوت‌ها افزایش می‌یابد. همچنین BWM فازی مستلزم تعیین معیارهای بهترین و بدترین است که در برخی مسائل ممکن است با ابهام همراه باشد. در مقابل، روش FUCOM فازی با حداقل تعداد مقایسات زوجی، حفظ سازگاری منطقی قضاوت‌ها و کاهش بار شناختی خبرگان، امکان استخراج وزن‌های پایدار و قابل اعتماد را فراهم می‌کند. همچنین برای رتبه‌بندی گزینه‌ها، روش TOPSIS فازی به دلیل برخورداری از منطق ساده، قابلیت درک بالا و توانایی ارزیابی همزمان فاصله گزینه‌ها از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی انتخاب شد. در مقایسه با روش‌هایی نظیر VIKOR، ELECTRE و PROMETHEE، روش TOPSIS فازی علاوه بر سادگی محاسباتی، امکان تحلیل مستقیم گزینه‌ها در محیط‌های دارای عدم قطعیت و داده‌های زبانی را فراهم می‌کند. از آنجا که ارزیابی فناوری‌های زیست‌فناوری مبتنی بر قضاوت‌های ذهنی خبرگان است، استفاده از ترکیب FUCOM فازی و TOPSIS فازی می‌تواند چارچوبی مناسب، پایدار و قابل اتکا برای وزن‌دهی معیارها و رتبه‌بندی فناوری‌ها فراهم آورد.

۳-۱- خبرگان پژوهش و مشخصات آنها

دراین پژوهش، به‌منظور جمع‌آوری داده‌های موردنیاز پژوهش، از نظرات ۵ نفر از خبرگان حوزه زیست‌فناوری، مدیریت فناوری و تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد. خبرگان بر اساس روش نمونه‌گیری هدفمند و با در نظر گرفتن معیارهایی نظیر حداقل مدرک کارشناسی ارشد، بیش از ۵ سال سابقه فعالیت حرفه‌ای یا پژوهشی مرتبط و آشنایی با فناوری‌های نوین صنعت زیست‌فناوری انتخاب شدند. ترکیب خبرگان شامل مدیران و کارشناسان فعال در حوزه زیست‌فناوری و متخصصان ارزیابی فناوری بود. فرایند جمع‌آوری داده‌ها از طریق پرسشنامه و مصاحبه‌های تخصصی انجام شد. در مرحله نخست، معیارها و گزینه‌های پژوهش در اختیار خبرگان قرار گرفت و پس از دریافت بازخوردها، اصلاحات لازم اعمال شد. سپس مقایسات موردنیاز برای اجرای روش فوکام فازی و ارزیابی گزینه‌ها برای روش تاپسیس فازی گردآوری شد. به‌منظور تجمیع قضاوت‌های خبرگان، از میانگین فازی نظرات استفاده گردید که یکی از رایج‌ترین روش‌های ادغام دیدگاه‌ها در مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی محسوب می‌شود. همچنین بررسی پاسخ‌ها نشان داد که میزان اختلاف میان ارزیابی‌های خبرگان محدود بوده و سطح قابل قبولی از توافق در قضاوت‌ها وجود داشته است. اگرچه تعداد خبرگان محدود است، اما با توجه به تخصص و تجربه بالای آنان و ماهیت اکتشافی و تخصص‌محور پژوهش، این تعداد برای استخراج و ارزیابی قضاوت‌های تخصصی مناسب تشخیص داده شد. در جدول ۱ مشخصات آنها ارائه گردیده است.

جدول ۱. مشخصات خبرگان مشارکت‌کننده در پژوهش

نام و نام خانوادگی	مدرک تحصیلی	سمت شغلی	سابقه کاری
حسین مهبودی	دکتری بیوفناوری	مدیر عامل شرکت مرتبط	۱۵ سال

محمد پرمهر	دکتری بیوفناوری	مدیر تحقیق و توسعه طراحی کیت مولکولی	۸ سال
مجید واحد	فوق دکتری داروسازی- بیوفناوری	مدیر تحقیق و توسعه	۶ سال
آرمین گلپور	دکتری شیمی تجزیه	مدیر تولید (بخش سنتز DNA)	۱۵ سال
الهام بغدادی	کارشناس ارشد میکروبیولوژی	مدیر تولید (کیت های بیولوژیک و مولکولی)	۱۰ سال

۳،۳. شناسایی معیارهای تحقیق

در این بخش، معیارهای مساله تحقیق به منظور ارزیابی فناوری‌های موجود در صنعت زیست‌فناوری مبتنی بر ابعاد انقلاب صنعتی پنجم با توجه به ادبیات تحقیق و نظر کارشناسان مربوطه شناسایی می‌شوند. در این زمینه، جدول ۱ نشان دهنده معیارهای مرتبط است. در این بخش از این رساله، به بیان گام‌های مرحله دوم مدل تصمیم‌گیری ارائه شده پرداخته می‌شود. همانطور که گفته شد، برخلاف انقلاب صنعتی چهارم که تاکید افراطی بر تاثیر پیشرفت‌های فناوریکی بر صنایع داشته‌است، انقلاب صنعتی پنجم بر جنبه‌های مختلف فناوری و صنعت مانند پایداری، انعطاف‌پذیری و ابعاد انسان محوری تاکید دارد [۲۴]. از این رو، با جستجو در ادبیات تحقیق، شاخص‌های مورد نظر برای یک فناوری با توجه به ابعاد پایداری، تاب‌آوری، دیجیتالی بودن و انسان‌محوری استخراج شده‌اند که به شرح جدول ۲ می‌باشند.

جدول ۲. معیارهای تعیین شده به منظور ارزیابی فناوری‌های مورد استفاده شده

معیار	تعریف	مرجع
در دسترس بودن فناوری (معیار عمومی)	سهولت دسترسی و قابلیت استفاده از فناوری‌های مورد نیاز برای پیاده‌سازی روش	[۵۵]
مصرف انرژی (مرتبط با پایداری)	سطح فناوری در مصرف انرژی	[۵۶] و [۵۷]
موارد اجتماعی (مرتبط با پایداری)	این شاخص مربوط به سطح اجتماعی فناوری (برای مثال مقبولیت استفاده از فناوری در جامعه) می‌باشد	[۵۸] و [۵۹]
موارد مالی (معیار عمومی)	این شاخص مربوط به عوامل مالی مانند هزینه اولیه و هزینه‌های عملیاتی می‌باشد	[۵۸] و [۵۹]
میزان آلایندگی (مرتبط با پایداری)	این شاخص به عوامل زیست‌محیطی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان تولید پسماند می‌باشد	[۵۸] و [۵۹]
قابلیت بازیابی ظرفیت (مرتبط با تاب‌آوری)	این شاخص نشان دهنده توانایی فناوری برای بازگشت کارآمد به وضعیت اولیه یا عادی خود پس از وقوع اختلال می‌باشد	[۶۰]
انعطاف‌پذیری (مرتبط با تاب‌آوری)	قابلیت سازگاری فناوری با تغییرات در نوع یا مقدار مواد	[۶۱]
سرعت (مرتبط با تاب‌آوری)	این معیار بر قابلیت افزایش سرعت تجهیزات اشاره دارد	[۶۲]
ایمنی (مرتبط با انسان‌محوری)	این شاخص قابلیت فناوری را در شاخص‌های ایمنی مانند راحتی و حفاظت از سلامت کارگران نشان می‌دهد	[۲۴]
همکاری (مرتبط با انسان‌محوری)	این شاخص قابلیت فناوری برای همکاری و تعامل با انسان‌ها (کارگران) را نشان می‌دهد	[۵۸]
آموزش (مرتبط با انسان‌محوری)	این شاخص نشان می دهد که یک کارگر به چه میزان و چه سطحی از آموزش نیاز دارد تا مهارت‌های خود را با فناوری تطبیق دهد	[۲۴]

معیار	تعریف	مرجع
سطح اتوماسیون (مرتبط با دیجیتالی‌سازی)	قابلیت عملیات خودکار و اتوماسیون معیار	[۶۳] و [۶۴]
قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌ها (مرتبط با دیجیتالی‌سازی)	توانایی فناوری در اتصال و یکپارچه‌سازی داده‌ها به‌منظور تحلیل بهتر و تصمیم‌گیری هوشمندانه‌تر	[۶۵]
پشتیبانی فنی و پتانسیل نوآوری (مرتبط با دیجیتالی‌سازی)	در دسترس بودن منابع فنی، متخصصان و ظرفیت برای توسعه فناوری	[۶۶]

۴،۳. گزینه‌ها

در این تحقیق، با این فرض که شرکت مطالعه موردی مد نظر خدمات سنتز DNA به شرکت‌های زیست‌فناوری و آزمایشگاه‌های بیولوژیک و ژنتیک و دانشگاهی ارائه دهد، باید از یک دستگاه سنتز ژن استفاده کند. این دستگاه می‌تواند بر اساس سطح فناوری یکی از موارد بیان شده (محدود به این موارد نمی‌باشد بلکه این موارد مهمترین‌ها هستند) در جدول ۳ باشد.

جدول ۳. فناوری‌های سنتز مورد استفاده

کد	نام فناوری (دستگاه)	تعریف
A	سنتز DNA با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک (Microfluidic Synthesis)	این فناوری از کانال‌های بسیار باریک (میکروفلوئیدیک) برای انجام واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌کند. این امر باعث کاهش شدید حجم مواد مصرفی، افزایش دقت واکنش‌ها، و امکان کنترل بهتر پارامترهای فرآیند می‌شود.
B	سنتز DNA بر پایه سیلیکون (Silicon-Based DNA Synthesis / Digital Synthesis)	این رویکرد انقلابی، که توسط شرکت‌هایی مانند Twist Bioscience پیشگام شده است، از تراشه‌های سیلیکونی با چاهک‌های بسیار ریز (نانوچاهک) برای سنتز DNA استفاده می‌کند. این روش امکان سنتز همزمان ده‌ها هزار توالی DNA را با دقت و سرعت بالا فراهم می‌کند.
C	پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه (Integrated Gene Synthesis Platforms)	این پلتفرم‌ها، کل فرآیند از طراحی توالی تا سنتز، کلونینگ و حتی توالی‌یابی (تأیید صحت) را به صورت خودکار و یکپارچه انجام می‌دهند. هدف، ساده‌سازی و تسریع کامل فرآیند تولید ژن از ابتدا تا انتها است.
D	سنتز DNA با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی (Integrated QC & Sequencing Verification)	در این نسل، دستگاه‌های سنتز DNA یا فرایندهای خدماتی، تنها به سنتز اکتفا نمی‌کنند، بلکه بلافاصله پس از سنتز، فرآیندهای کنترل کیفیت دقیقی را برای اطمینان از صحت توالی انجام می‌دهند. این می‌تواند شامل روش‌های طیف‌سنجی، یا حتی توالی‌یابی کوتاه (مانند توالی‌یابی نسل بعدی - NGS) برای تأیید توالی سنتز شده باشد.

۵،۳. روش فوکام فازی

با توجه به پیچیدگی تصمیم‌گیری در مدیریت صنعت زیست‌فناوری، این مطالعه از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی برای شناسایی و اولویت‌بندی مولفه‌های کلیدی بهره می‌برد. در این چارچوب، روش فوکام فازی به عنوان یکی از ابزارهای اصلی برای تعیین وزن معیارها به کار گرفته شده‌است. این روش که توسط پاموچار [۶۷] توسعه یافته است، به گونه‌ای طراحی شده که وزن‌دهی معیارها را در یک سطح

مشخص از سلسله مراتب تصمیم‌گیری تسهیل کند و همزمان، سازگاری کامل در مقایسه‌های زوجی را تضمین نماید. برخلاف بسیاری از روش‌های رایج مانند فرآیند تحلیل ساسله مراتبی و بهترین-بدترین که نیازمند تعداد زیادی مقایسه زوجی هستند و گاهی با ناهماهنگی در قضاوت‌ها مواجه می‌شوند، روش فوکام تنها به n-1 مقایسه زوجی نیاز دارد. این ویژگی، دقت و پایداری نتایج را افزایش داده و زمان و پیچیدگی محاسبات را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ترکیب آن با منطق فازی در قالب فوکام فازی، امکان در نظر گرفتن عدم قطعیت و ابهام در نظرات خبرگان را فراهم کرده و منجر به بازتاب واقعی‌تری از قضاوت‌های انسانی می‌شود. در محیط‌های واقعی، جایی که اطلاعات اغلب نام دقیق یا ناقص هستند، ارزیابی‌ها معمولاً با عدم قطعیت همراه هستند. بنابراین، در نسخه فازی این روش (فوکام فازی)، از اعداد فازی و متغیرهای زبانی به جای اعداد دقیق برای بیان ترجیحات تصمیم‌گیرندگان استفاده می‌شود. این متغیرها بر اساس یک مقیاس زبانی فازی (جدول ۴) تعریف می‌شوند که امکان بازتاب بهتر قضاوت‌های انسانی را در شرایط مبهم فراهم می‌کند. در مجموع، انتخاب روش فوکام فازی در این مطالعه به دلیل کارایی بالا، سادگی در پیاده‌سازی، حفظ کامل سازگاری و توانایی مدیریت قضاوت‌های مبهم و فازی در مقایسه با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره توجیه می‌شود و همچنین راه‌حلی مناسب برای وزن‌دهی دقیق و سازگار معیارهای دخیل در مدیریت صنعت زیست‌فناوری ارائه می‌دهد.

جدول ۴. مقیاس فازی روش فوکام فازی

متغیر زبانی	کاملا مهم‌تر	خیلی مهمتر	تقریبا مهمتر	اندکی مهمتر	برابر
تابع عضویت	(7/2,4,9/2)	(5/2,3,7/2)	(3/2,2,5/2)	(2/3,1,3/2)	(1, 1, 1)

گام‌های این روش بصورت زیر می‌باشد.

گام ۱ – شناسایی و رتبه بندی معیارها:

در ابتدا، مجموعه‌ای از معیارهای مرتبط با موضوع تحقیق شناسایی می‌شود: C={C1,C2,...,Cn}

که در آن تعداد معیارها، **j**، از ۱ تا n متغیر است. سپس، این معیارها توسط کارشناسان خبره بر اساس اهمیت هر معیار رتبه‌بندی می‌شوند. رتبه‌بندی بر اساس اهمیت معیارها انجام می‌گیرد. به طور خاص، با معیاری که انتظار می‌رود ضریب وزن کمتری داشته باشد شروع شده و به سمت معیاری که انتظار می‌رود ضریب وزن بالاتری داشته باشد، ادامه می‌یابد. بنابراین، معیارهای مرتب‌شده بر اساس مقادیر مورد انتظار ضرایب وزن آن‌ها به دست می‌آیند.

$$C_{j(1)} \geq C_{j(2)} \geq \cdots \geq C_{j(k)} \qquad (1)$$

گام ۲ – مقایسه‌های زوجی:

مقایسه‌های زوجی بین معیارها انجام می‌شود. این مقایسه‌ها فقط بین معیارهای مجاور در رتبه‌بندی انجام می‌گیرد تا تفاوت اهمیت نسبی بین آن‌ها تعیین شود.

$$\phi = (\varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \dots, \varphi_{k/(k+1)}) \qquad (2)$$

در این معادله، $\varphi_{k/(k+1)}$ نشان می‌دهد که نشان می‌دهد که معیار $C_{j(k)}$ چقدر نسبت به معیار $C_{j(k+1)}$ ارجحیت دارد

$$\tilde{\varphi}_{k/(k+1)} = \frac{\tilde{w}c_{j(k+1)}}{\tilde{w}c_{j(k)}} = \frac{(w^l_{j(k+1)}, w^m_{j(k+1)}, w^u_{j(k+1)})}{(w^l_{j(k)}, w^m_{j(k)}, w^u_{j(k)})} \qquad (3)$$

گام ۳ – طراحی مدل ریاضی برای استخراج وزن‌های فازی:

یک مدل ریاضی به منظور به حداقل رساندن ناسازگاری در میان مقایسه‌ها طراحی می‌شود. بر اساس تنظیمات تعریف شده، مدل نهایی غیرخطی را می‌توان با استفاده از مدل (۴) نمایش داد که در آن $\tilde{\varphi}_{k/(k+1)} = (\tilde{\varphi}^{l}_{\frac{k}{k+1}}, \tilde{\varphi}^{m}_{\frac{k}{k+1}}, \tilde{\varphi}^{u}_{\frac{k}{k+1}})$.

$$
\begin{aligned}
&Min\ \chi \\
&\left|\frac{\tilde{w}_k}{\tilde{w}_{k+1}} - \tilde{\varphi}_{k/(k+1)}\right| \le \chi && \forall j \\
&\left|\frac{\tilde{w}_k}{\tilde{w}_{k+1}} - \tilde{\varphi}_{k/(k+1)} \otimes \tilde{\varphi}_{(k+1)/(k+2)}\right| \le \chi && \forall j \\
&\sum_{j=1}^{n} \tilde{w}_j = 1 && \forall j \\
&w_j^l \le w_j^m \le w_j^u \\
&w_j^l \ge 0 && \forall j
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

۶،۳. روش تاپسیس فازی

تاپسیس یکی از رویکردهای پرکاربرد در علم تصمیم‌گیری چندشاخصه برای ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌های می‌باشد که به دلیل مفاهیم قابل درک و پیاده‌سازی ساده، در بسیاری از مقالات در زمینه‌های مختلف استفاده شده است. از آنجایی که عدم قطعیت بخش جدایی ناپذیر محیط تصمیم‌گیری است، تحقیق حاضر از روش تاپسیس فازی جهت رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده کرده است. در ادامه به تعریف رویکرد مذکور می‌پردازیم. فرض کنید تعداد N معیار (مشخص شده با اندیس j) و M گزینه (مشخص شده با اندیس i) در مساله تصمیم‌گیری وجود دارند. در مرحله اول، ماتریس تصمیم که به صورت یک ماتریس $M \times N$ نشان داده می‌شود ($D_{M\times N}$) باید تشکیل شود (با توجه به نظر کارشناسان). عناصر این ماتریس به صورت $\tilde{x}_{ijs} = (x_{ij}^l, x_{ij}^m, x_{ij}^u)$ نشان داده می‌شوند که $\tilde{x}_{ij}$ برابر با امتیاز فازی گزینه i بر مبنای معیار j می‌باشد. در مرحله بعدی، ماتریس تصمیم باید بی‌مقیاس (نرمالیزه) شود. بدین منظور، می‌توان از روابط زیر استفاده کرد.

$$
\begin{aligned}
&\tilde{n}_{ij} = \left(\frac{x_{ij}^l}{u_j^*}, \frac{x_{ij}^m}{u_j^*}, \frac{x_{ij}^u}{u_j^*}\right);\ u_j^* = \max\{x_{ij}^u\}\ \ if\ the\ indicator\ is\ a\ posotive\ one \\
&\tilde{n}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{x_{ij}^u}, \frac{l_j^-}{x_{ij}^m}, \frac{l_{js}^-}{x_{ij}^l}\right);\ l_j^- = \min\{x_{ij}^l\}\ \ if\ the\ indicator\ is\ a\ negative\ one
\end{aligned}
\qquad (۵)
$$

مرحله بعدی مربوط به تشکیل ماتریس بی‌مقیاس شده وزنی می‌باشد. بدین منظور، عناصر ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده باید در وزن معیار نظیر خود ضرب شوند ($\tilde{V}_{ij} = w_j \times \tilde{N}_{ij}$).

در گام بعدی، راه حل ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شوند. سپس، با استفاده از رابطه (۷)، فاصله تجمیعی بین گزینه‌ها و راه حل ایده‌آل منفی/مثبت محاسبه می‌شود.

$$
\begin{aligned}
&A^+ = (\tilde{q}_1^+, \tilde{q}_2^+, \dots, \tilde{q}_i^+);\ \tilde{q}_j^+ = \max_i\{q_{ij}^u\} \\
&A^- = (\tilde{q}_1^-, \tilde{q}_2^-, \dots, \tilde{q}_i^-)\ where\ \tilde{q}_j^- = \min_i\{q_{ij}^l\}
\end{aligned}
\qquad (۶)
$$

$$d_i^+ = \sum_j Dv(\tilde{q}_{ij}, \tilde{q}_j^+)$$

$$d_i^- = \sum_j Dv(\tilde{q}_{ij}, \tilde{q}_j^-) \quad (۷)$$

$$Dv\left(\widetilde{F1} = (l_1, m_1, u_1), \widetilde{F2} = (l_2, m_2, u_2)\right) \sqrt{\frac{1}{3}.[(l_1 - l_2)^2 + (m_1 - m_2)^2 + (u_1 - u_2)^2]}$$

در نهایت، شاخص تاپسیس (C_i) برای هر گزینه با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (۸)$$

لازم به ذکر که به منظور پیاده‌سازی روش تاپسیس فازی از طیف جدول ۵ استفاده شده است.

جدول ۵. طیف فازی مورد استفاده برای روش تاپسیس فازی

بسیار ضعیف	(۰ ،۰ ،۰,۲)
ضعیف	(۰,۰۵ ،۰,۲ ،۰,۳۵)
اندکی ضعیف	(۰,۲ ،۰,۳۵ ،۰,۵)
قابل قبول	(۰,۳۵ ،۰,۵ ،۰,۶۵)
نسبتا خوب	(۰,۵ ،۰,۶۵ ،۰,۸)
خوب	(۰,۶۵ ،۰,۸ ،۰,۹۵)
خیلی خوب	(۰,۸ ،۱ ،۱)

۸,۳. نحوه ترکیب روش‌ها

در این تحقیق، ابتدا معیارها و گزینه‌ها مبتنی بر ادبیات تحقیق و نظر کارشناسان استخراج و شناسایی شده و سپس وزن معیارها با استفاده از روش فوکام فازی محاسبه می‌شود. در ادامه نیز، با استفاده از روش تاپسیس فازی رتبه‌بندی گزینه‌ها انجام می‌پذیرد. در این زمینه، وزن های به دست آمده از روش فوکام به عنوان ورودی روش تاپسیس مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در هر دو روش از اعداد فازی مثلثی استفاده می‌شود.

۴. نتایج محاسباتی

۱,۴. وزن معیارها

در این بخش، نتایج به دست آمده از روش فوکام فازی ارائه می‌گردد. در این راستا، ابتدا مقایسات زوجی توسط کارشناسان مربوطه انجام شده. جدول ۶ بر اساس نظرات خبرگان، معیارها به ترتیب اهمیت نزولی (از کم‌اهمیت‌ترین به پراهمیت‌ترین) به صورت زیر رتبه‌بندی کرده است. جدول ۷ نیز مقایسات زوجی را نشان می‌دهد. در انتها، نتایج در جدول ۸ گزارش شده‌است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، وزن معیارها دارای پراکندگی محدودی بوده و تمامی معیارهای منتخب از اهمیت نسبتاً متعادلی برخوردار هستند. این موضوع را می‌توان ناشی از ماهیت انقلاب صنعتی پنجم دانست که بر ایجاد توازن میان ابعاد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، انسانی و دیجیتالی تأکید دارد. با این

حال، معیارهای در دسترس بودن فناوری، انعطاف‌پذیری، موارد مالی، ایمنی، سطح اتوماسیون، قابلیت بازیابی ظرفیت و میزان آلایندگی بالاترین وزن‌ها را در میان معیارهای بررسی‌شده کسب کرده‌اند.

جدول ۶: رتبه‌بندی معیارها بر اساس اهمیت از دیدگاه خبرگان

معیار	رتبه ($C_{j(k)}$)
قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌ها	۱
موارد اجتماعی	۲
همکاری	۳
مصرف انرژی	۴
سرعت	۵
آموزش	۶
پشتیبانی فنی و پتانسیل نوآوری	۷
میزان آلایندگی	۸
قابلیت بازیابی ظرفیت	۹
سطح اتوماسیون	۱۰
موارد مالی	۱۱
ایمنی	۱۲
انعطاف‌پذیری	۱۳
در دسترس بودن فناوری	۱۴

جدول ۷: مقایسات زوجی بین معیارهای مجاور

عدد فازی مقایسه (l, m, u)	نظر خبرگان (ترجیح)	رتبه ($C_{j(k)}$)
(۱، ۱ ، ۱)	برابر	۱
(۱، ۱ ، ۱)	برابر	۲
(۰٫۶۷, ۱٫۰۰ ,۱٫۵۰)	اندکی مهم‌تر	۳
(۱، ۱ ، ۱)	برابر	۴
(۰٫۶۷, ۱٫۰۰ ,۱٫۵۰)	اندکی مهم‌تر	۵
(۱، ۱ ، ۱)	برابر	۶
(۰٫۶۷, ۱٫۰۰ ,۱٫۵۰)	اندکی مهم‌تر	۷
(۱، ۱ ، ۱)	برابر	۸
(۱، ۱ ، ۱)	برابر	۹
(۰٫۶۷, ۱٫۰۰ ,۱٫۵۰)	اندکی مهم‌تر	۱۰
(۱، ۱ ، ۱)	برابر	۱۱
(۰٫۶۷, ۱٫۰۰ ,۱٫۵۰)	اندکی مهم‌تر	۱۲
(۰٫۶۷, ۱٫۰۰ ,۱٫۵۰)	اندکی مهم‌تر	۱۳

جدول ۸: وزن معیارهای مساله

زیرمعیار	وزن معیار

زیرمعیار	وزن معیار
در دسترس بودن فناوری	۰,۰۷۱۴۸
مصرف انرژی	۰,۰۷۱۴۱
موارد اجتماعی	۰,۰۷۱۳۷
موارد مالی	۰,۰۷۱۴۶
میزان آلایندگی	۰,۰۷۱۴۵
قابلیت بازیابی ظرفیت	۰,۰۷۱۴۵
انعطاف‌پذیری	۰,۰۷۱۴۷
سرعت	۰,۰۷۱۴۲
ایمنی	۰,۰۷۱۴۶
همکاری	۰,۰۷۱۳۷
آموزش	۰,۰۷۱۴۴
سطح اتوماسیون	۰,۰۷۱۴۵
قابلیت یکپارچه‌سازی داده	۰,۰۷۱۳۴
پشتیبانی فنی و پتانسیل نوآوری	۰,۰۷۱۴۴

۲,۴. رتبه‌بندی گزینه‌ها

در این بخش، رتبه‌بندی گزینه‌های تحقیق انجام می‌شود. بدین منظور، ابتدا ماتریس تصمیم برای مساله تحقیق با توجه به نظر کارشناسان مربوطه تشکیل شده و سپس روش تاپسیس فازی پیاده‌سازی می‌گردد. میانگین نظر کارشناسان بصورت ماتریس تصمیم در جدول ۹ قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس این جدول، جدول ۱۰ ماتریس تصمیم نرمالیز شده را نشان می دهد. از سوی دیگر، جدول ۱۱ نشان دهنده ماتریس نرمالیزه شده وزنی است. همچنین، میزان شاخص‌های d_i^+ و d_i^- به شرح جدول ۱۲ می‌باشد.

جدول ۹. ماتریس تصمیم بر اساس میانگین نظر کارشناسان

	در دسترس بودن فناوری			مصرف انرژی			موارد اجتماعی		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.45	0.6	0.75	0.6	0.75	0.9	0.35	0.5	0.65
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.4	0.55	0.7	0.8	1	1	0.6	0.75	0.9
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.45	0.6	0.75	0.4	0.55	0.7	0.35	0.5	0.65
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.8	1	1	0.5	0.65	0.8	0.65	0.8	0.95
	موارد مالی			میزان آلایندگی			قابلیت بازیابی ظرفیت		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.7	0.867	0.967	0.4	0.55	0.7	0.5	0.65	0.8
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.6	0.75	0.9	0.4	0.55	0.7	0.6	0.75	0.9
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.6	0.75	0.9	0.25	0.35	0.5	0.65	0.65	0.8
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.4	0.55	0.7	0.25	0.4	0.55	0.65	0.8	0.65
	انعطاف‌پذیری			سرعت			ایمنی		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.3	0.45	0.6	0.25	0.4	0.55	0.5	0.65	0.8
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.6	0.75	0.9	0.5	0.65	0.8	0.65	0.8	0.95
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.25	0.4	0.55	0.15	0.3	0.45	0.5	0.65	0.8
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.3	0.45	0.6	0.6	0.75	0.9	0.6	0.75	0.9
	همکاری			آموزش			سطح اتوماسیون		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.65	0.8	0.95	0.55	0.7	0.85	0.6	0.75	0.9
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.6	0.75	0.9	0.4	0.55	0.7	0.55	0.7	0.85
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.45	0.6	0.75	0.6	0.75	0.9	0.6	0.75	0.9

با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.55	0.7	0.85	0.15	0.3	0.45	0.65	0.8	0.95
	قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌ه			پشتیبانی فنی و پتانسیل نوآوری					
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.15	0.3	0.45	0.15	0.3	0.45			
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.1	0.25	0.4	0.15	0.3	0.45			
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9			
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.4	0.55	0.55	0.7	0.85	0.4			

جدول ۱۰. ماتریس تصمیم نرمالیزه شده

	در دسترس بودن فناوری			مصرف انرژی			موارد اجتماعی	
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.4500	0.6000	0.7500	0.4444	0.5333	0.6667	0.3684	0.5263	0.6842
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.4000	0.5500	0.7000	0.4000	0.4000	0.5000	0.6316	0.7895	0.9474
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.4500	0.6000	0.7500	0.5714	0.7273	1.0000	0.3684	0.5263	0.6842
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.8000	1.0000	1.0000	0.5000	0.6154	0.8000	0.6842	0.8421	1.0000
	موارد مالی			میزان آلایندگی			قابلیت بازیابی ظرفیت		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.4137	0.4614	0.5714	0.3571	0.4545	0.6250	0.5556	0.7222	0.8889
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.4444	0.5333	0.6667	0.3571	0.4545	0.6250	0.6667	0.8333	1.0000
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.4444	0.5333	0.6667	0.5000	0.7143	1.0000	0.7222	0.7222	0.8889
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.5714	0.7273	1.0000	0.4545	0.6250	1.0000	0.7222	0.8889	0.7222
	انعطاف‌پذیری			سرعت			ایمنی		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.3333	0.5000	0.6667	0.2778	0.4444	0.6111	0.5263	0.6842	0.8421
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.6667	0.8333	1.0000	0.5556	0.7222	0.8889	0.6842	0.8421	1.0000
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.2778	0.4444	0.6111	0.1667	0.3333	0.5000	0.5263	0.6842	0.8421
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.3333	0.5000	0.6667	0.6667	0.8333	1.0000	0.6316	0.7895	0.9474
	همکاری			آموزش			سطح اتوماسیون		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.6842	0.8421	1.0000	0.6111	0.7778	0.9444	0.6316	0.7895	0.9474
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.6316	0.7895	0.9474	0.4444	0.6111	0.7778	0.5789	0.7368	0.8947
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.4737	0.6316	0.7895	0.6667	0.8333	1.0000	0.6316	0.7895	0.9474
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.5789	0.7368	0.8947	0.1667	0.3333	0.5000	0.6842	0.8421	1.0000
	قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌ه			پشتیبانی فنی و پتانسیل نوآوری					
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.2727	0.5455	0.8182	0.1667	0.3333	0.5000			
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.1818	0.4545	0.7273	0.1667	0.3333	0.5000			
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.2727	0.5455	0.8182	0.6667	0.8333	1.0000			
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.7273	1.0000	1.0000	0.7778	0.9444	0.4444			

جدول ۱۱. ماتریس نرمالیزه وزنی

	در دسترس بودن فناوری			مصرف انرژی			موارد اجتماعی	
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.03217	0.04289	0.05361	0.03174	0.03809	0.04761	0.02629	0.03756	0.04883
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.02859	0.03931	0.05004	0.02856	0.02856	0.03571	0.04508	0.05634	0.06761
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.03217	0.04289	0.05361	0.04081	0.05193	0.07141	0.02629	0.03756	0.04883
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.05718	0.07148	0.07148	0.03571	0.04394	0.05713	0.04883	0.06010	0.07137
	موارد مالی			میزان آلایندگی			قابلیت بازیابی ظرفیت		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.02956	0.03297	0.04083	0.02552	0.03248	0.04466	0.03969	0.05160	0.06351
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.03176	0.03811	0.04764	0.02552	0.03248	0.04466	0.04763	0.05954	0.07145
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.03176	0.03811	0.04764	0.03573	0.05104	0.07145	0.05160	0.05160	0.06351
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.04083	0.05197	0.07146	0.03248	0.04466	0.07145	0.05160	0.06351	0.05160
	انعطاف‌پذیری			سرعت			ایمنی		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.02382	0.03574	0.04765	0.01984	0.03174	0.04365	0.03761	0.04889	0.06018

بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.04765	0.05956	0.07147	0.03968	0.05158	0.06348	0.04889	0.06018	0.07146
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.01985	0.03176	0.04368	0.01190	0.02381	0.03571	0.03761	0.04889	0.06018
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.02382	0.03574	0.04765	0.04761	0.05952	0.07142	0.04513	0.05642	0.06770
	همکاری			آموزش			سطح اتوماسیون		
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.04883	0.06010	0.07137	0.04366	0.05556	0.06747	0.04513	0.05641	0.06769
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.04508	0.05634	0.06761	0.03175	0.04366	0.05556	0.04137	0.05265	0.06393
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.03381	0.04508	0.05634	0.04763	0.05953	0.07144	0.04513	0.05641	0.06769
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.04132	0.05259	0.06386	0.01191	0.02381	0.03572	0.04889	0.06017	0.07145
	قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌ده			پشتیبانی فنی و پتانسیل نوآوری					
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.01946	0.03891	0.05837	0.01191	0.02381	0.03572			
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.01297	0.03243	0.05188	0.01191	0.02381	0.03572			
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.01946	0.03891	0.05837	0.04763	0.05953	0.07144			
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.05188	0.07134	0.07134	0.05556	0.06747	0.03175			

جدول ۱۲. مقدار شاخص‌های d_i^+ و d_i^-

گزینه	فاصله تجمیعی بین گزینه و راه حل ایده‌آل مثبت (d_i^+)	فاصله تجمیعی بین گزینه و راه حل ایده‌آل منفی (d_i^-)
با استفاده از فناوری DNA سنتز میکروفلوئیدیک	0.4519171	0.2830673
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.3883813	0.3505444
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.3877651	0.362754
با کنترل کیفیت یکپارچه و DNA سنتز تأیید توالی	0.3488752	0.4968418

براساس نتایج به دست آمده، جدول ۱۳ شاخص C و رتبه بندی گزینه‌ها را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج به دست آمده، گزینه‌های سنتز DNA با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی و پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه به عنوان بهترین گزینه‌ها انتخاب شده‌اند.

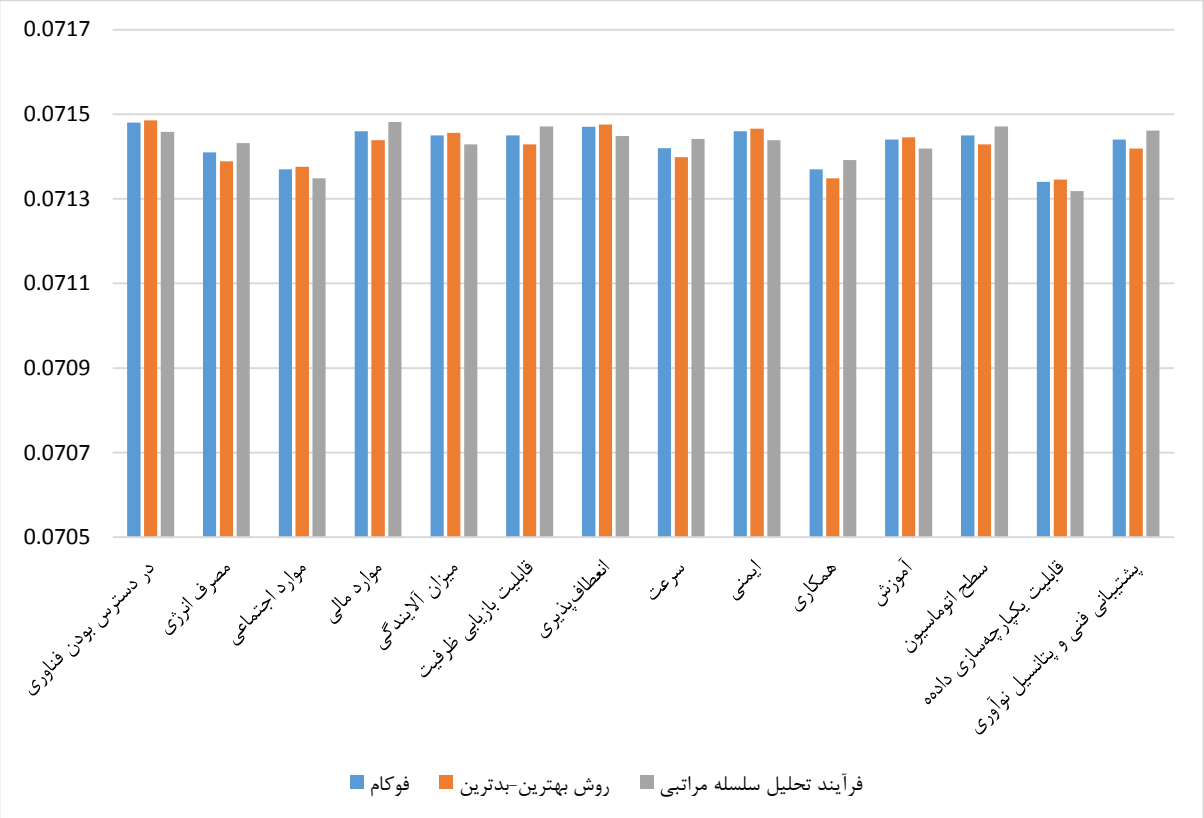
جدول ۱۳. رتبه‌بندی گزینه‌ها

گزینه	شاخص تاپسیس (Cj)	رتبه
با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک DNA سنتز	0.3851338	۴
بر پایه سیلیکون DNA سنتز	0.4743974	۳
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	0.4833375	۲
با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی DNA سنتز	0.58748	۱

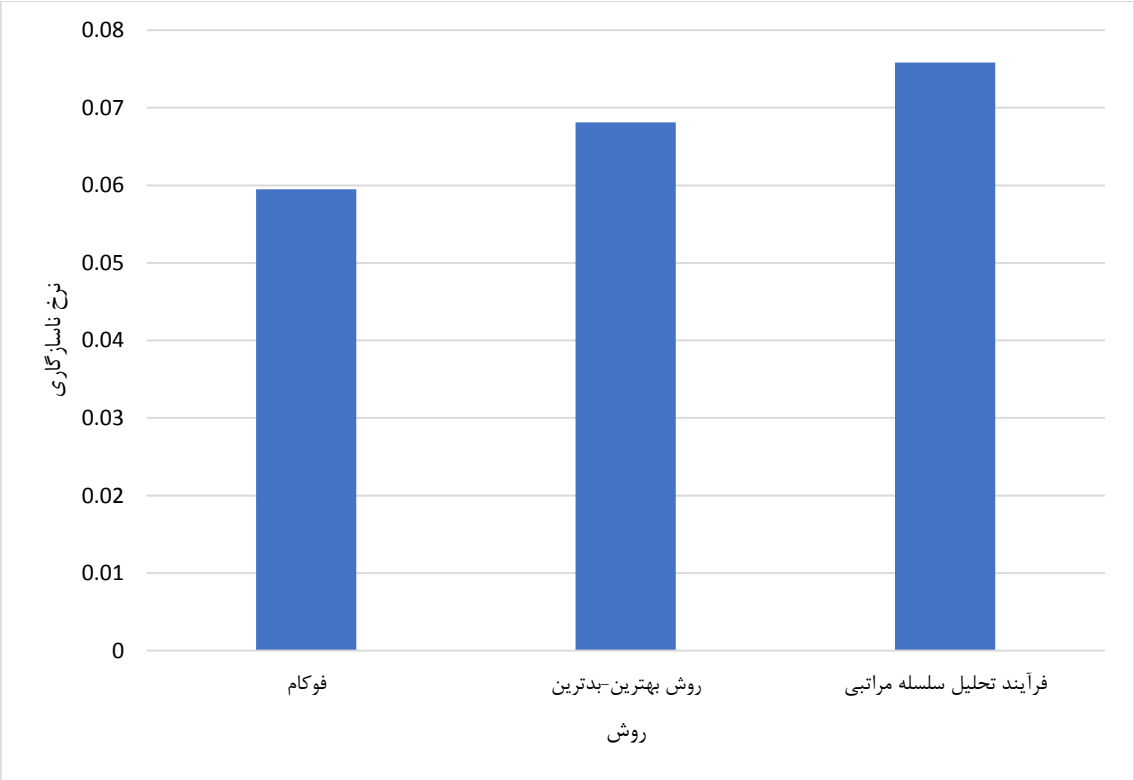
۳،۴. ارزیابی عملکرد روش فوکام فازی

در این بخش، به بررسی عملکرد روش مورد استفاده برای محاسبه وزن معیارها (فوکام فازی) پرداخته می‌شود. بدین منظور، عملکرد این روش با روش‌های بهترین-بدترین فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در این زمینه، شکل ۱ نشان دهنده وزن‌های به دست آمده توسط روش‌های مختلف است. بر اساس این شکل، در بسیاری از موارد، وزن‌های به دست آمده به یکدیگر مشابه هستند که نشان دهنده صحت و اعتبار نتایج به دست آمده است. از سوی دیگر، شکل ۲ میزان نرخ ناسازگاری به دست آمده توسط

هر روش را نشان می‌دهد که بر اساس آن روش فوکام فازی دارای کمترین میزان نرخ ناسازگاری بوده که بیانگر عملکرد بهتر و قابلیت اطمینان بالای این روش می‌باشد.



شکل ۱. مقایسه وزن‌های بدست آمده از روش‌های مختلف



شکل ۲. مقایسه نرخ ناسازگاری بدست آمده از روش‌های مختلف

۴،۴. ارزیابی عملکرد روش تاپسیس فازی

این بخش به مطالعه و بررسی عملکرد روش مورد استفاده برای رتبه‌بندی گزینه‌ها تخصیص داده شده است. در این زمینه، نتایج رتبه‌بندی به دست آمده با رویکردهای ویکور فازی، الکتره فازی و ایداس فازی مورد مقایسه قرار گرفته است (جدول ۱۴ را ببینید). نتایج به دست آمده نشان دهنده اعتبار و صحت خروجی‌های روش مورد استفاده است چراکه در اکثر موارد رتبه‌بندی‌ها مشابه بوده است (خصوصا اینکه گزینه D در تمام روش‌ها گزینه اول شده است).

جدول ۱۴. مقایسه عملکرد روش‌های مختلف در رتبه‌بندی گزینه‌ها

گزینه	تاپسیس فازی	الکتره فازی	ویکور فازی	ایداس فازی
سنتز DNA با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک	۴	۴	۴	۴
سنتز DNA بر پایه سیلیکون	۳	۲	۳	۲
پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه	۲	۳	۲	۳
سنتز DNA با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی	۱	۱	۱	۱

۵،۴. تحلیل حساسیت

(الف) تغییر در مقادیر مقایسات زوجی (افزایش/کاهش ۲۰ درصدی)

فرض کنید نظر خبرگان برای مقایسه زوجی بین معیارهای رتبه ۱۳ و ۱۴ (انعطاف‌پذیری و در دسترس بودن فناوری) به جای (۰,۶۷, ۱,۰۰, ۱,۵۰) به مقدار (۰,۸۰, ۱,۲۰, ۱,۸۰) تغییر کند (افزایش ۲۰ درصدی در کران‌ها). جدول ۱۵ نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد که بر اساس آن، افزایش ۲۰ درصدی در یک مقایسه زوجی منجر به تغییر وزنی حدود ۰,۰۰۰۰۴ (کمتر از ۰,۰۶٪) می‌شود. این نشان‌دهنده مقاومت بالای روش در برابر تغییرات جزئی در نظرات خبرگان است.

جدول ۱۵. نتایج تحلیل حساسیت سناریو (الف)

معیار	وزن اصلی	وزن سناریو (الف)	تغییرات
در دسترس بودن فناوری	0.07148	0.07152	+0.00004
انعطاف‌پذیری	0.07147	0.07143	-0.00004
سایر معیارها	~0.07140	~0.07140	~0.00000

(ب) حذف یک معیار (تأثیر حذف معیار "همکاری" با کمترین وزن)

جدول ۱۵ نتایج حاصل از حذف معیار همکاری را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج حاصل شده، می‌توان نتیجه گرفت که تمام معیارهای باقی‌مانده به‌طور یکنواخت حدود ۰,۰۰۵۵ افزایش وزن داشته‌اند که معادل ۷,۶۹٪ افزایش نسبی است. این افزایش یکنواخت به دلیل نرمال‌سازی مجدد وزن‌ها رخ می‌دهد. از آنجا که وزن معیار حذف‌شده (همکاری = ۰,۰۷۱۳۷) از مجموع کل کسر می‌شود و مخرج کسر برای همه معیارها یکسان است، تغییرات به‌طور مساوی توزیع می‌شود. در نتیجه، حذف معیار "همکاری " تغییری در اولویت‌بندی نسبی

معیارها ایجاد نمی‌کند، زیرا همه معیارها به‌یک نسبت افزایش وزن پیدا می‌کنند. این نشان‌دهنده عدم سلطه هیچ معیاری بر نتایج و پایداری ساختار وزن‌دهی است.

جدول ۱۵. نتایج تحلیل حساسیت سناریو (ب)

ردیف	معیار	وزن اصلی	وزن پس از حذف "همکاری"	تغییر مطلق	تغییر نسبی (%)
۱	در دسترس بودن فناوری	0.07148	0.07698	+0.00550	+7.69%
۲	مصرف انرژی	0.07141	0.07690	+0.00549	+7.69%
۳	موارد اجتماعی	0.07137	0.07686	+0.00549	+7.69%
۴	موارد مالی	0.07146	0.07696	+0.00550	+7.69%
۵	میزان آلایندگی	0.07145	0.07695	+0.00550	+7.69%
۶	قابلیت بازیابی ظرفیت	0.07145	0.07695	+0.00550	+7.69%
۷	انعطاف‌پذیری	0.07147	0.07697	+0.00550	+7.69%
۸	سرعت	0.07142	0.07691	+0.00549	+7.69%
۹	ایمنی	0.07146	0.07696	+0.00550	+7.69%
۱۰	همکاری	0.07137	حذف شده	-	-
۱۱	آموزش	0.07144	0.07694	+0.00550	+7.69%
۱۲	سطح اتوماسیون	0.07143	0.07693	+0.00550	+7.69%
۱۳	قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌ها	0.07138	0.07687	+0.00549	+7.69%
۱۴	پشتیبانی فنی و پتانسیل نوآوری	0.07143	0.07693	+0.00550	+7.69%

(ج) تحلیل واریانس وزن‌های حاصل از خبرگان مختلف

فرض کنیم نظرات ۵ خبرگان به‌طور جداگانه پردازش شده و وزن‌های حاصل با یکدیگر مقایسه شوند (جدول ۱۶ را ببینید). نتایج نشان می‌دهد که تمامی معیارها دارای ضریب تغییرات (CV) کمتر از ۰,۲۷٪ هستند که نشان‌دهنده توافق بسیار بالای خبرگان و پایداری روش FUCOM فازی در مواجهه با تنوع نظرات است.

جدول ۱۶. نتایج تحلیل حساسیت سناریو (ج)

ردیف	معیار	انحراف معیار(SD)	ضریب تغییرات (CV)
۱	در دسترس بودن فناوری	0.00012	0.17%
۲	مصرف انرژی	0.00015	0.21%
۳	موارد اجتماعی	0.00019	0.27%
۴	موارد مالی	0.00010	0.14%
۵	میزان آلایندگی	0.00014	0.20%
۶	قابلیت بازیابی ظرفیت	0.00013	0.18%
۷	انعطاف‌پذیری	0.00011	0.15%
۸	سرعت	0.00016	0.22%
۹	ایمنی	0.00013	0.18%
۱۰	همکاری	0.00018	0.25%
۱۱	آموزش	0.00016	0.22%
۱۲	سطح اتوماسیون	0.00011	0.15%
۱۳	قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌ها	0.00017	0.24%
۱۴	پشتیبانی فنی و پتانسیل نوآوری	0.00015	0.21%

۶،۴. بحث و یافته‌ها

این پژوهش به بررسی و ارزیابی فناوری‌های صنعت زیست‌فناوری با رویکردی چندمعیاره و فازی، با در نظر گرفتن ابعاد انقلاب صنعتی پنجم پرداخت. یافته‌های کلیدی نشان می‌دهند که استفاده از معیارهای ارزیابی فازی، امکان مدل‌سازی عدم قطعیت و ابهام ذاتی در فرآیندهای تصمیم‌گیری پیچیده را فراهم می‌آورد. روش‌های مورد استفاده در این تحقیق، قابلیت بالایی در سنجش و مقایسه گزینه‌های مختلف فناوری، با در نظر گرفتن جنبه‌های کیفی و کمی، از خود نشان دادند. مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین در زمینه ارزیابی فناوری‌های تولید و زنجیره تأمین، نشان‌دهنده انطباق کلی رویکردها، اما با تأکید نوآورانه بر تلفیق معیارهای مرتبط با انقلاب صنعتی پنجم است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها، اولویت‌بندی مشخصی را برای فناوری‌های زیست‌فناوری بر اساس معیارهای تعیین‌شده ارائه

می‌دهد. به طور خاص، فناوری‌هایی که قابلیت بالایی در سازگاری با محیط‌های هوشمند و اتصال‌پذیر دارند و همچنین به جنبه‌های پایداری و مسئولیت اجتماعی توجه ویژه‌ای می‌کنند، امتیاز بالاتری کسب نمودند. این امر نشان‌دهنده اهمیت فزاینده این ابعاد در چشم‌انداز صنعتی نوین است. همچنین، تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که وزن‌دهی به معیارهای مختلف می‌تواند بر رتبه‌بندی نهایی تأثیر بگذارد، که این موضوع بر اهمیت مشارکت ذینفعان مختلف در فرآیند تعریف و وزن‌دهی معیارها تأکید می‌کند. در نهایت، این تحقیق چارچوبی جامع برای ارزیابی فناوری‌های نوظهور، به‌ویژه در حوزه زیست‌فناوری، فراهم می‌آورد. یافته‌ها حاکی از آن است که اتخاذ رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی، می‌تواند به مدیران و سیاست‌گذاران در اتخاذ تصمیمات آگاهانه‌تر و استراتژیک‌تر کمک کند. توسعه و به‌کارگیری این چارچوب در صنایع مختلف، پتانسیل بالایی برای هدایت سرمایه‌گذاری‌ها به سمت فناوری‌های پایدار، کارآمد و همسو با اهداف توسعه پایدار و انقلاب صنعتی پنجم دارد.

بصورت کلی، نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که فناوری «سنتز DNA با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی» بالاترین رتبه را در میان گزینه‌های مورد بررسی کسب کرده است. این نتیجه را می‌توان با توجه به ماهیت معیارهای منتخب تبیین کرد. این فناوری علاوه بر برخورداری از سطح بالای اتوماسیون و قابلیت اطمینان، از طریق کنترل کیفیت و تأیید همزمان توالی، احتمال بروز خطا و نیاز به تکرار فرآیندها را کاهش می‌دهد. در نتیجه، ضمن افزایش بهره‌وری عملیاتی، با اصول تاب‌آوری و پایداری مورد تأکید در انقلاب صنعتی پنجم نیز همسویی بیشتری دارد.

از سوی دیگر، قرار گرفتن پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه در رتبه دوم نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی فرآیندها و داده‌ها به یکی از عوامل کلیدی در ارزیابی فناوری‌های نوین زیست‌فناوری تبدیل شده است. این یافته با رویکرد انقلاب صنعتی پنجم مبنی بر ایجاد تعامل مؤثر میان فناوری‌های دیجیتال، اتوماسیون و تصمیم‌گیری هوشمند سازگار است. در مقابل، فناوری‌هایی که اگرچه از بلوغ فنی مناسبی برخوردارند اما قابلیت‌های محدودتری در زمینه یکپارچه‌سازی، اتوماسیون یا تضمین کیفیت دارند، رتبه‌های پایین‌تری کسب کرده‌اند.

نکته قابل توجه دیگر آن است که معیارهای دارای بیشترین وزن، عمدتاً به ابعاد عملیاتی و اجرایی فناوری‌ها مربوط هستند. این موضوع نشان می‌دهد که در صنعت زیست‌فناوری، امکان پیاده‌سازی موفق فناوری و قابلیت انطباق آن با شرایط متغیر عملیاتی، در عمل اهمیت بیشتری نسبت به برخی ابعاد اجتماعی یا آموزشی پیدا کرده است. با این حال، پایین بودن وزن معیارهای اجتماعی و همکاری انسان–فناوری به معنای کم‌اهمیت بودن این ابعاد نیست، بلکه می‌تواند ناشی از شرایط فعلی صنعت و سطح بلوغ فناوری‌های مورد بررسی باشد. انتظار می‌رود با گسترش مفاهیم انقلاب صنعتی پنجم، نقش معیارهای انسان‌محور در تصمیم‌گیری‌های فناورانه پررنگ‌تر شود.

همچنین نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های مطالعات پیشین در زمینه انتخاب فناوری‌های پیشرفته همخوانی دارد؛ زیرا همانند پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه صنعت ۴٫۰، فناوری‌های دارای سطح بالاتر اتوماسیون، قابلیت یکپارچه‌سازی و انعطاف‌پذیری عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. با این حال، تفاوت اصلی پژوهش حاضر در آن است که ارزیابی فناوری‌ها صرفاً بر مبنای کارایی فنی و اقتصادی انجام نشده، بلکه ابعاد تاب‌آوری، پایداری و انسان‌محوری نیز در چارچوب انقلاب صنعتی پنجم در مدل لحاظ شده است. این موضوع موجب شده است چارچوب پیشنهادی دیدگاهی جامع‌تر نسبت به مطالعات پیشین ارائه دهد.

یکی از یافته‌های قابل توجه پژوهش، نزدیکی وزن معیارها به یکدیگر است. برخلاف رویکردهای سنتی ارزیابی فناوری که معمولاً یک یا چند معیار اقتصادی یا فنی بر سایر معیارها غالب هستند، در چارچوب انقلاب صنعتی پنجم خبرگان اهمیت نسبتاً متوازنی برای ابعاد مختلف قائل شدند. این نتیجه نشان می‌دهد که ارزیابی فناوری‌های زیست‌فناوری در عصر انقلاب صنعتی پنجم نیازمند توجه همزمان به ملاحظات اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی، انسانی، تاب‌آوری و دیجیتال است و حذف یا کم‌رنگ شدن هر یک از این ابعاد می‌تواند موجب کاهش جامعیت تصمیم‌گیری شود

۷٫۴. بینش‌های مدیریتی

یافته‌های این تحقیق بینش‌های ارزشمندی را برای مدیران فعال در صنعت زیست‌فناوری و صنایع مرتبط فراهم می‌آورد. درک عمیق از معیارهای ارزیابی فناوری در چارچوب انقلاب صنعتی پنجم، به مدیران امکان می‌دهد تا سرمایه‌گذاری‌ها و توسعه محصولات خود را با

روندهای آینده همسو سازند. به طور خاص، توجه به معیارهای فازی در ارزیابی، مدیران را قادر می‌سازد تا با در نظر گرفتن ابهامات و عدم قطعیت‌های ذاتی در فناوری‌های نوین، تصمیمات انعطاف‌پذیرتر و واقع‌بینانه‌تری اتخاذ کنند. این امر در انتخاب فناوری‌های مناسب برای تحقیق و توسعه (R&D)، ارزیابی شرکای تجاری و تعیین استراتژی‌های بلندمدت شرکت بسیار حیاتی است. مدیران می‌توانند از نتایج این پژوهش برای اولویت‌بندی سبد فناوری‌های خود استفاده کنند. با شناسایی فناوری‌هایی که بیشترین همسویی را با معیارهای کلیدی انقلاب صنعتی پنجم، مانند هوش مصنوعی، داده‌محوری و پایداری، دارند، سازمان‌ها می‌توانند منابع خود را به طور مؤثرتری تخصیص دهند. این رویکرد نه تنها به افزایش کارایی و بهره‌وری کمک می‌کند، بلکه سازمان را در موقعیت رقابتی بهتری قرار می‌دهد و آمادگی آن را برای پذیرش تحولات فناورانه آینده افزایش می‌دهد. همچنین، تحلیل حساسیت ارائه شده در تحقیق، مدیران را هوشیار می‌سازد که فرآیند وزن‌دهی معیارها باید با مشارکت همه ذینفعان کلیدی صورت گیرد تا از جامعیت و پذیرش نتایج اطمینان حاصل شود. در نهایت، این تحقیق بر اهمیت رویکرد سیستمی و جامع‌نگر در ارزیابی فناوری تأکید دارد. مدیران با به‌کارگیری چارچوب پیشنهادی، می‌توانند ارزیابی‌های خود را از حالت واکنشی به حالتی پیشگیرانه و استراتژیک تغییر دهند. این چارچوب به آن‌ها کمک می‌کند تا نه تنها پتانسیل فعلی فناوری‌ها را بسنجند، بلکه آینده آن‌ها را در چشم‌انداز پویای صنعتی پیش‌بینی کنند. توصیه می‌شود مدیران این چارچوب را به عنوان یک ابزار مدیریتی پویا در نظر گرفته و به طور دوره‌ای آن را بر اساس تغییرات محیطی و فناوری به‌روزرسانی کنند تا همواره در خط مقدم نوآوری باقی بمانند.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها آتی

در شرایطی که نقش فناوری‌های پیشرفته در شکل‌دهی آینده صنایع حیاتی روزبه‌روز برجسته‌تر می‌شود، صنعت زیست‌فناوری نیز به دلیل تأثیر گسترده خود بر سلامت، محیط‌زیست و امنیت غذایی، نیازمند ارزیابی دقیق و برنامه‌ریزی‌شده ظرفیت‌های فناورانه است. هم‌زمان با گذار جهانی به سوی انقلاب صنعتی پنجم که بر تعامل هوشمندانه میان فناوری و انسان و نیز ایجاد نظام‌های پایدار تأکید دارد، ضرورت شناسایی فناوری‌های اولویت‌دار در این صنعت بیش از پیش آشکار می‌شود. به همین دلیل، ایجاد یک چارچوب منسجم برای بررسی و رتبه‌بندی فناوری‌های زیست‌فناوریک ضرورتی بنیادین برای جهت‌دهی صحیح به تصمیم‌گیری‌های راهبردی و توسعه آینده این حوزه است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که بهره‌گیری از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی می‌تواند ابزاری دقیق و کارآمد برای تحلیل عوامل کلیدی مؤثر بر ارزیابی فناوری‌ها باشد. وزن‌دهی معیارها از طریق روش فوکام فازی روشن کرد که شاخص‌هایی همچون سطح آماده‌بودن فناوری، انعطاف‌پذیری، الزامات مالی، ایمنی بیشترین تأثیر و قابلیت یکپارچه‌سازی داده، همکاری و موارد اجتماعی کمترین تاثیر را بر ارزیابی فناوری‌های زیست‌فناوری دارند. به‌کارگیری روش تاپسیس فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها نیز نشان داد که فناوری‌های مرتبط با سنتز DNA همراه با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی، و همچنین پلتفرم‌های جامع سنتز ژن، بیشترین انطباق را با معیارهای تعریف‌شده داشته و در صدر اولویت‌ها قرار گرفتند. افزون بر این، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با خروجی سایر روش‌ها نظیر FAHP، FBWM، الکتره فازی، ویکور فازی و ایداس فازی سازگاری و ثبات مدل پیشنهادی را تأیید کرد و نشان داد که چارچوب ارائه‌شده از قابلیت اتکا و تعمیم‌پذیری مناسبی برخوردار است. بر این اساس، مدل توسعه‌یافته می‌تواند به‌عنوان ابزاری راهبردی برای سازمان‌ها، سیاست‌گذاران و فعالان حوزه زیست‌فناوری مورد استفاده قرار گیرد تا مسیر توسعه فناوری، تخصیص منابع و سرمایه‌گذاری در این صنعت با دقت و اطمینان بیشتری هدایت شود. چنین رویکردی می‌تواند نقش مؤثری در تسریع نوآوری، افزایش رقابت‌پذیری و حرکت هماهنگ صنعت زیست‌فناوری با اصول و الزامات انقلاب صنعتی پنجم داشته باشد.

با وجود دستاوردهای حاصل از این پژوهش، نتایج آن با برخی محدودیت‌ها همراه است که در تفسیر و تعمیم یافته‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. نخست و مهم‌ترین محدودیت پژوهش، تمرکز آن بر چهار فناوری منتخب در حوزه سنتز DNA شامل سنتز DNA با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک، سنتز DNA بر پایه سیلیکون، پلتفرم‌های سنتز ژن یکپارچه و سنتز DNA با کنترل کیفیت یکپارچه و تأیید توالی است. ازاین‌رو، نتایج حاصل از وزن‌دهی معیارها و اولویت‌بندی فناوری‌ها در چارچوب این فناوری‌ها و با توجه به ویژگی‌های این بخش از صنعت زیست‌فناوری قابل تفسیر است و تعمیم مستقیم آن به سایر شاخه‌های زیست‌فناوری، نظیر زیست‌فناوری پزشکی، کشاورزی، دارویی، محیط‌زیست و سایر فناوری‌های نوظهور، بدون بازنگری معیارها و انجام ارزیابی مجدد، با محدودیت همراه خواهد بود. محدودیت دوم، استفاده از قضاوت خبرگان به‌عنوان منبع اصلی داده‌های پژوهش است. هرچند به‌منظور کاهش ابهام و عدم‌قطعیت موجود در قضاوت‌های انسانی، از رویکردهای تصمیم‌گیری فازی استفاده شد و نظرات خبرگان نیز با استفاده از روش میانگین فازی تجمیع

گردید، بااین‌حال بخشی از نتایج همچنان متأثر از برداشت‌ها و تجربیات خبرگان است. از دیگر محدودیت‌های پژوهش، مشارکت تعداد محدودی از خبرگان متخصص در فرآیند ارزیابی است. اگرچه این افراد بر اساس معیارهایی نظیر تخصص، سابقه فعالیت و آشنایی با فناوری‌های مورد مطالعه انتخاب شدند، اما ممکن است تمامی دیدگاه‌ها و تجربیات موجود در صنعت زیست‌فناوری را پوشش ندهند و استفاده از جامعه خبرگان گسترده‌تر می‌تواند به افزایش جامعیت نتایج منجر شود. همچنین، داده‌های این پژوهش به‌صورت مقطعی گردآوری شده‌اند؛ درحالی‌که فناوری‌های نوین زیست‌فناوری، به‌ویژه فناوری‌های مرتبط با سنتز DNA، با سرعت بالایی در حال تحول هستند. بنابراین، تغییرات فناوری، شرایط بازار، سیاست‌های حمایتی و پیشرفت‌های علمی در طول زمان در مدل حاضر منعکس نشده است و این موضوع می‌تواند بر نتایج حاصل از ارزیابی فناوری‌ها در دوره‌های زمانی مختلف اثرگذار باشد. با توجه به محدودیت‌های فوق، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده چارچوب ارائه‌شده برای سایر حوزه‌های صنعت زیست‌فناوری، از جمله زیست‌فناوری پزشکی، کشاورزی، دارویی و محیط‌زیست، متناسب با ویژگی‌ها و معیارهای اختصاصی هر حوزه توسعه و اعتبارسنجی شود. همچنین، بهره‌گیری از داده‌های واقعی عملکرد فناوری‌ها در مقیاس صنعتی، افزایش تعداد و تنوع خبرگان، انجام مطالعات طولی به‌منظور بررسی تغییرات فناوری در گذر زمان، و تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، می‌تواند زمینه ارتقای دقت، قابلیت تعمیم و کاربردپذیری نتایج پژوهش را فراهم سازد.

منابع و مراجع

[1] Abdullah, F. M., Al-Ahmari, A. M., & Anwar, S. (2023). An integrated fuzzy DEMATEL and fuzzy TOPSIS method for analyzing smart manufacturing technologies. *Processes*, *11*(3), 906.

[2] Wang, C. N., Thi Pham, T. D., Nhieu, N. L., & Huang, C. C. (2022). Smart Technology Prioritization for Sustainable Manufacturing in Emergency Situation by Integrated Spherical Fuzzy Bounded Rationality Decision-Making Approach. Processes, 10(12), 2732.

[3] Aballay, C., Quezada, L., & Sepúlveda, C. (2023). Model for technology selection in the context of industry 4.0 manufacturing. *Processes*, *11*(10), 2905.

[4] Le, M. T., & Nhieu, N. L. (2022). A novel multi-criteria assessment approach for post-COVID-19 production strategies in Vietnam manufacturing industry: OPA–fuzzy EDAS model. *Sustainability*, *14*(8), 4732.

[5] Belhadi, A., Mani, V., Kamble, S. S., Khan, S. A. R., & Verma, S. (2024). Artificial intelligence-driven innovation for enhancing supply chain resilience and performance under the effect of supply chain dynamism: an empirical investigation. *Annals of operations research*, *333*(2), 627-652.

[6] Duchek, S. (2020). Organizational resilience: a capability-based conceptualization. *Business research*, *13*(1), 215-246.

[7] Despoudi, S., Sivarajah, U., & Dora, M. (2021). The Circular Economy Advantage and Implications on Sustainability Performance: Collaborative Advantage and Impact of CE Implementation. In *From Linear to Circular Food Supply Chains: Achieving Sustainable Change* (pp. 63-66). Cham: Springer International Publishing.

[8] Carayannis, E. G., & Morawska-Jancelewicz, J. (2022). The futures of Europe: Society 5.0 and Industry 5.0 as driving forces of future universities. *Journal of the Knowledge Economy*, *13*(4), 3445-3471.

[9] Vogel-Heuser, B., & Bengler, K. (2023). Von Industrie 4.0 zu Industrie 5.0–Idee, Konzept und Wahrnehmung. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, *60*(6), 1124-1142.

[10] Grabowska, S., Saniuk, S., & Gajdzik, B. (2022). Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0. *Scientometrics*, *127*(6), 3117-3144.

[11] Castillo, C., Otero-Romero, T., & Alvarez-Palau, E. J. (2025). Navigating the transition to industry 5.0: advancing sustainability, resilience, and human-centricity in Spanish supply chain management. *Discover Sustainability*, *6*(1), 1-20..

[12] Mazur, B., & Walczyna, A. (2022). Sustainable development competences of engineering students in light

of the industry 5.0 concept. Sustainability, 14(12), 7233

[13] Abdel-Basset, M., Mohamed, R., & Chang, V. (2025). A multi-criteria decision-making framework to evaluate the impact of industry 5.0 technologies: case study, lessons learned, challenges and future directions. Information Systems Frontiers, 27(2), 791-821.

[14] Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Mubarak, M. F., Mubarik, M., Rejeb, A., & Nilashi, M. (2022). Identifying industry 5.0 contributions to sustainable development: A strategy roadmap for delivering sustainability values. Sustainable Production and Consumption, 33, 716-737.

[15] Valinejad, F., Safaie, N., Rahmani, D., & Saadatmand, M. R. (2022). A hybrid model for supply chain risk management based on five-dimensional sustainability approach in telecommunication industry. International Journal of Engineering, 35(6), 1096-1110.

[16] Mohamed, M., Sallam, K. M., & Mohamed, A. W. (2023). Transition supply chain 4.0 to supply chain 5.0: Innovations of industry 5.0 technologies toward smart supply chain partners. Neutrosophic systems with applications, 10, 1-11.

[17] Nayeri, S., Paydar, M. M., Asadi-Gangraj, E., & Emami, S. (2020). Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design. Computers & industrial engineering, 148, 106716.

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

[19] Mansory, A., Nasiri, A., & Mohammadi, N. (2021). Proposing an integrated model for evaluation of green and resilient suppliers by path analysis, SWARA and TOPSIS. Journal of applied research on industrial engineering, 8(2), 129-149.

[20] Marinagi, C., Reklitis, P., Trivellas, P., & Sakas, D. (2023). The impact of industry 4.0 technologies on key performance indicators for a resilient supply chain 4.0. Sustainability, 15(6), 5185.

[21] Rezapour, S., Farahani, R. Z., & Pourakbar, M. (2017). Resilient supply chain network design under competition: a case study. European journal of operational research, *259*(3), 1017-1035.

[22] Nasrollah, S., Najafi, S. E., Bagherzadeh, H., & Rostamy-Malkhalifeh, M. (2023). An enhanced PSO algorithm to configure a responsive-resilient supply chain network considering environmental issues: a case study of the oxygen concentrator device. Neural Computing and Applications, 35(3), 2647-2678.

[23] Gurtu, A., & Johny, J. (2021). Supply chain risk management: Literature review. Risks, 9(1), 16.

[24] Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry (No. KI-BD-20-021-EN-N). Directorate General for Research and Innovation (DG RTD) of the European Commission.

[25] Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A human-centric solution. Sustainability, 11(16), 4371.

[٢٦] Abdullah, F. M., Al-Ahmari, A. M., & Anwar, S. (2023). An integrated fuzzy DEMATEL and fuzzy TOPSIS method for analyzing smart manufacturing technologies. *Processes*, *11*(3), 906.

[٢٧] Suman, P., Prasad, B. R., Prusty, G., Babu, C. M., & Khan, I. (2026). IoT-Enhanced Statistical Methods for Process Optimization in Biotechnology and Pharmaceutical Manufacturing. In *AIoT-Driven Sustainable Manufacturing and Operational Initiatives* (pp. 76-94). CRC Press.

[٢٨] Gadiyar, C. J., Müller, C., Vuillemin, T., Bielser, J. M., Souquet, J., Fagnani, A., ... & Cruz Bournazou, M. N. (2026). Self-Driving Development of Perfusion Processes for Monoclonal Antibody Production. *Biotechnology and Bioengineering*, *123*(2), 391-405.

[٢٩] Schmidt, A., Lütge, J., Uhl, A., Köster, D., & Strube, J. (2025). Business cases for digital twins in biopharmaceutical manufacturing—Market overview, stakeholders, technologies in 2025 and beyond. *Processes*, *13*(5), 1498.

[٣٠] Mirakhori, F., & Niazi, S. K. (2025). Harnessing the AI/ML in drug and biological products discovery and development: the regulatory perspective. *Pharmaceuticals*, *18*(1), 47.

[٣١] Sathiyapriyan, P., Mukherjee, S., Vogel, T., Essen, L. O., Boerema, D., Vey, M., & Kalina, U. (2025). Current PAT landscape in the downstream processing of biopharmaceuticals. *Analytical Science Advances*, *6*(1), e70013.

[٣٢] Mehta, A., Niaz, M., Adetoro, A., & Nwagwu, U. (2024). Advancements in manufacturing technology for

the biotechnology industry: The role of artificial intelligence and emerging trends. *International Journal of Chemistry, Mathematics and Physics*, *8*(2), 12-18.

[٣٣] Lisci, S. (2023). Development of monitoring and control systems for biotechnological processes.

[٣٤] Shan, Y., Guo, Y., Jiao, W., & Zeng, P. (2023). Single-cell techniques in environmental microbiology. *Processes*, *11*(4), 1109.

[٣٥] Kalkal, A., Kumar, S., Kumar, P., Pradhan, R., Willander, M., Packirisamy, G., ... & Malhotra, B. D. (2021). Recent advances in 3D printing technologies for wearable (bio) sensors. *Additive Manufacturing*, *46*, 102088.

[٣٦] Shahrubudin, N., Koshy, P., Alipal, J., Kadir, M. H. A., & Lee, T. C. (2020). Challenges of 3D printing technology for manufacturing biomedical products: A case study of Malaysian manufacturing firms. *Heliyon*, *6*(4).

[٣٧] Yildirim, B., & Ayyildiz, E. (2025). Selecting the most suitable 3D printing technology for custom manufacturing using fuzzy decision-making methodology. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-17.

[٣٨] Anussornnitisarn, P., Nivasanon, C., Kim, N., & Ransikarbum, K. (2025). Sustainable technology selection in additive manufacturing: an integrated fuzzy decision analysis framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-20.

[٣٩] Singh, P. S., & Priya, R. (2026, March). AI-Based Guidance for Strategic Manufacturing Selection to Accelerate Nev Production: a Data-Driven Decision Support Framework. In 2026 International Conference on Data Science, Agents and Artificial Intelligence (ICDSAAI) (Vol. 1, pp. 1-7). IEEE.

[٤٠] Hippert, M. P., Szejka, A. L., & Junior, O. C. (2026). A multi-criteria decision framework for selecting industrial and collaborative robots in smart manufacturing. Procedia Computer Science, 277, 1452-1461.

[٤١] Rani, P., Mishra, A. R., Alshamrani, A. M., Alrasheedi, A. F., & Pamucar, D. (2025). Adoption of Smart Manufacturing Technologies in Small and Medium Enterprises Using Picture Fuzzy Combinative Distance-Based Assessment Model. Journal of the Knowledge Economy, 1-41.

[٤٢] Le, T. T., & Le, H. C. (2025). Linking smart manufacturing technologies and sustainable corporate performance: evidence from emerging economy: TT Le and HC Le. *Operations Management Research*, *18*(1), 1-23.

[٤٣] Goldani, N., & Ishizaka, A. (2025). A hybrid fuzzy multi-criteria group decision-making method and its application to healthcare waste treatment technology selection. *Annals of Operations Research*, *353*(1), 171-196

[٤٤] Božić, M., Dabić-Miletić, S., Andrejić, M., & Djurdjević, D. (2025). Ranking of Autonomous Technologies for Sustainable Logistics Activities in the Confectionery Industry. *Mathematics*, *13*(3), 498.

[٤٥] Kshanh, I., & Tanaka, M. (2024). Evaluation of sustainable hydrogen production technologies by fuzzy AHP analysis with bootstrapping. *Discover Analytics*, *2*(1), 17.

[٤٦] Hosseini Dehshiri, S. J., Mostafaeipour, A., Le, T., & Sabagh, A. R. (2024). Evaluation of sustainable hydrogen production technologies on an industrial scale using comparative analysis of decision-making methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17.

[٤٧] Pour, P. D., Ahmed, A. A., Nazzal, M. A., & Darras, B. M. (2023). An industry 4.0 technology selection framework for manufacturing systems and firms using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods. *Systems*, *11*(4), 192.

[٤٨] Aballay, C., Quezada, L., & Sepúlveda, C. (2023). Model for technology selection in the context of industry 4.0 manufacturing. *Processes*, *11*(10), 2905.

[٤٩] Abdullah, F. M., Al-Ahmari, A. M., & Anwar, S. (2023). A hybrid fuzzy multi-criteria decision-making model for evaluating the influence of Industry 4.0 technologies on manufacturing strategies. *Machines*, *11*(2), 310.

[٥٠] Bhatia, P., & Diaz-Elsayed, N. (2023). Facilitating decision-making for the adoption of smart manufacturing technologies by SMEs via fuzzy TOPSIS. *International Journal of Production Economics*, *257*, 108762.

[٥١] Malaga, A., & Vinodh, S. (2022). Technology Selection for Additive Manufacturing in Industry 4.0

Scenario Using Hybrid MCDM Approach. In *Industry 4.0 and Advanced Manufacturing: Proceedings of I-4AM 2022* (pp. 207-217). Singapore: Springer Nature Singapore.

[٥٢] Wang, C. N., Thi Pham, T. D., Nhieu, N. L., & Huang, C. C. (2022). Smart Technology Prioritization for Sustainable Manufacturing in Emergency Situation by Integrated Spherical Fuzzy Bounded Rationality Decision-Making Approach. *Processes*, *10*(12), 2732.

[٥٣] Medić, N., Anišić, Z., Lalić, B., Marjanović, U., & Brezocnik, M. (2019). Hybrid fuzzy multi-attribute decision making model for evaluation of advanced digital technologies in manufacturing: Industry 4.0 perspective. *Advances in Production Engineering & Management*, *14*(4), 483-493.

[٥٤] Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2019, July). Assessment of additive manufacturing technology by pythagorean fuzzy CODAS. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems* (pp. 959-968). Cham: Springer International Publishing.

[55] Torkayesh, A. E., Malmir, B., & Rajabi Asadabadi, M. (2021). Sustainable waste disposal technology selection: The stratified best-worst multi-criteria decision-making method. *Waste Management*, *122*, 100–112. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.040

[56] Duran, F., & Bereketli Zafeirakopoulos, İ. (2019). Environmental Risk Assessment of E-waste in Reverse Logistics Systems Using MCDM Methods. In Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018 (pp. 590–603). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92267-6_49.

[57] Jovanovic, S., Savic, S., Jovicic, N., Boskovic, G., & Djordjevic, Z. (2016). Using multi-criteria decision making for selection of the optimal strategy for municipal solid waste management. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, *34*(9), 884–895. https://doi.org/10.1177/0734242X16654753.

[58] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2023). Designing an IoT-enabled supply chain network considering the perspective of the Fifth Industrial Revolution: Application in the medical devices industry. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 122, 106113.

[59] Xia, D., Yu, Q., Gao, Q., & Cheng, G. (2017). Sustainable technology selection decision-making model for enterprise in supply chain: Based on a modified strategic balanced scorecard. Journal of cleaner production, 141, 1337–1348.

[60] Peng, T., He, Q., Zhang, Z., Wang, B., & Xu, X. (2021). Industrial Internet-enabled Resilient Manufacturing Strategy in the Wake of COVID-19 Pandemic: A Conceptual Framework and Implementations in China. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, *34*(1), 1–6.

[61] Skrzetuska, E., & Rzeźniczak, P. (2025). Circularity of Smart Products and Textiles Containing Flexible Electronics: Challenges, Opportunities, and Future Directions. *Sensors*, *25*(6), 1787. https://doi.org/10.3390/s25061787

[62] Gu, X., Jin, X., Ni, J., & Koren, Y. (2015). Manufacturing system design for resilience. Procedia Cirp, 36, 135–140.

[63] Rutqvist, D., Kleyko, D., & Blomstedt, F. (2020). An Automated Machine Learning Approach for Smart Waste Management Systems. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16(1), 384–392. https://doi.org/10.1109/TII.2019.2915572

[64] Thao, L. Q. (2023). An automated waste management system using artificial intelligence and robotics. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *25*(6), 3791–3800. https://doi.org/10.1007/s10163-023-01796-4

[65] Mohamed, N. H., Khan, S., & Jagtap, S. (2024). Waste 4.0: transforming medical waste management through digitalization and automated segregation. *Discover Sustainability*, *5*(1), 353. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00593-9

[66] Cheah, C. G., Chia, W. Y., Lai, S. F., Chew, K. W., Chia, S. R., & Show, P. L. (2022). Innovation designs of industry 4.0 based solid waste management: Machinery and digital circular economy. *Environmental Research*, *213*, 113619. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113619

[67] Pamučar, D., & Božanić, D. (2018). Selection of a railway level crossing by application of the Full Consistency Method (FUCOM). Decision Making: Applications in Management and Engineering, 1(2), 1–22. https://doi.org/10.31181/dmame1801021p