

مروری بر رویکردهای اخیر تحقیق در عملیات انعطاف پذیری در طراحی سیستم تولید

فاطمه غضنفری^۱

فاطمه موحدی راد^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

چکیده

با توجه به افزایش عدم قطعیت تقاضا و تنوع محصول، سیستم های تولیدی باید به طور مداوم برای حفظ بهره وری سازگار شوند. به طور کلی، تصمیم گیرندگان می توانند انعطاف پذیری را برای در نظر گرفتن این سازگاری ها به طور موثر در مرحله طراحی سیستم های تولیدی حفظ کنند. در نتیجه، طی چند دهه گذشته، بخش قابل توجهی از ادبیات به طراحی سیستم های تولیدی مرتبط با پارادایم های مختلف تولیدی پرداخته و ادعا می کنند که سطح "مناسب" انعطاف پذیری را ارائه می دهند. روش های تحلیلی پیشرفته از تحقیقات عملیاتی اغلب در این حوزه برای پشتیبانی از تصمیم گیری استفاده می شوند. با این حال، مقالات مربوط به پارادایم های تولیدی در جریان های ادبی پراکنده باقی می ماند. در مطالعه حاضر، ادبیات دو دهه گذشته را که بر کاربرد روش های تحقیق عملیاتی در طراحی سیستم های تولیدی تمرکز دارد، مورد بررسی قرار گرفته است. مقالات مورد تجزیه و تحلیل از ادبیات علمی بررسی شده در یک فرآیند جستجوی سیستماتیک و غربالگری انتخاب شدند. برای متحد کردن ادبیات در مورد پارادایم های مختلف تولیدی، مفهوم انعطاف پذیری تولیدی با تمرکز بر انواع انعطاف پذیری مورد نیاز و در نظر گرفته شده در مراحل طراحی سیستم های تولیدی، تطبیق داده شده است. مقالات بررسی شده اغلب از برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط استفاده می کنند یا رویه های اکتشافی را پیشنهاد می دهند. اکثر مقالات، تنظیمات ایستا و قطعی را ارزیابی می کنند و عدم قطعیت های کوتاه مدت یا بلندمدت را در طراحی سیستم های تولیدی نادیده می گیرند. عمدتاً، انعطاف پذیری برای ارتقای اهداف اقتصادی یا عملکرد محور حفظ می شود. با این حال، توجه به شاخص های اجتماعی یا زیست محیطی به ندرت یافت می شود. بنابراین، دیدگاه های تحقیقاتی حاصل از این تحلیل شامل ادغام شاخص های اجتماعی و زیست محیطی در روش های تصمیم گیری چندهدفه، پیش بینی مشکلات برنامه ریزی مجاور در طول طراحی و اعمال رویه های سیستماتیک برای رسیدگی به عدم قطعیت است.

واژگان کلیدی

تولید، طراحی سیستم تولید، انعطاف پذیری تولید، بهینه سازی

۱. دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی (تحقیق در عملیات)، دانشگاه آزاد اسلامی فیروزکوه. F.Ghazanfari@ut.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی (تحقیق در عملیات)، دانشگاه آزاد اسلامی فیروزکوه. Movahedirad.official@gmail.com

۱. مقدمه

آدام اسمیت در سال ۱۷۷۶ بر مزایای تقسیم کار در مثال معروف «پین» تأکید کرد. در این مثال، او افزایش قابل توجهی در بهره‌وری ناشی از تخصص کارگران را مشاهده کرد (اسمیت، ۱۷۷۶/۱۹۷۹). در قرن بیستم، هنری فورد خطوط مونتاژ برای محصولات پیچیده را که با استفاده از نوار نقاله در کارخانه‌های فرآوری گوشت در شیکاگو ایجاد شده بود، معرفی کرد. بنابراین، او تخصص کارگران را با پیوند دادن جریان مواد بین آنها تکمیل کرد و افزایش بیشتر در راندمان تولید کالاهای استاندارد را به خود اختصاص داد (فورد، ۱۹۲۳/۲۰۱۵). با ظهور ربات‌های صنعتی، افزایش بیشتر راندمان در تولید ناشی از افزایش سطح اتوماسیون در دهه‌های بعدی بود که به ویژه در محیط‌هایی با تقاضای بالا و ثابت برای محصول محبوب هستند (کوهن، ۱۹۹۸؛ مولر، ۲۰۱۹). در دهه‌های پایانی قرن بیستم، الگوی صنعتی صرفه‌جویی به مقیاس به سمت صرفه‌جویی به محدوده گسترش یافت، زیرا تمایز محصولات به طور فزاینده‌ای اهمیت یافت و امروزه در شرکت‌های تولیدی به طور گسترده رواج دارد. سفارشی‌سازی انبوه محصولات به توانایی شرکت‌ها در ارائه محصولات سفارشی در حجم بالا با هزینه‌های معقول اشاره دارد (دیویس، ۱۹۸۹). افزایش تقاضا برای محصولات شخصی‌سازی شده (آهلهستروم و وستبروک، ۱۹۹۹). با چرخه عمر کوتاه‌تر محصول و گسترش رقابت بین بازیگران صنعتی همراه بود (پاین، ۱۹۹۳). در نتیجه، شرکت‌های تولیدی باید درجه بالایی از انعطاف‌پذیری را در فرآیندهای خود حفظ کنند تا تنوع محصول مورد نیاز را در نظر بگیرند. (داسیلویرا، بورنشتاین و فوگلیاتو، ۲۰۰۱). برنامه‌ریزی لازم برای فرآیندهای تولید صنعتی معمولاً تجزیه می‌شود. غالباً، این امر بر اساس مراحل زنجیره ارزش (تدارکات، تولید، توزیع و فروش) و افق برنامه‌ریزی (بلندمدت، میان‌مدت، کوتاه‌مدت) که با آنها مرتبط هستند، صورت می‌گیرد (فلایشمن، مایر و واگنر، ۲۰۱۵؛ رود، مایر و واگنر، ۲۰۰۰؛ اشنویس، ۲۰۰۳؛ استادلر، ۲۰۰۵). تنوع بالای محصول، فرآیندهای مورد نیاز در مرحله تولید را اساساً تغییر می‌دهد، عمدتاً به دلیل افزایش مواجهه شرکت‌ها با تغییرپذیری تقاضا در رابطه با کل تقاضا در هر دوره و ترکیب آن. بنابراین، یک چالش عمده مربوط به تعیین سطوح «مناسب» انعطاف‌پذیری و کارایی فرآیندهای تولیدی مرتبط با سبد محصولات ارائه شده است (ولینگ و همکاران، ۲۰۱۳).

فرآیندهای تولید با استفاده از سیستم‌های تولیدی اجرا می‌شوند. یک سیستم تولیدی، انسان، ماشین‌آلات و ایستگاه‌هایی را که توسط یک جریان مشترک مواد و اطلاعات به هم متصل شده‌اند، ترکیب می‌کند. در طراحی سیستم‌های تولیدی، نداشت الزامات عملکرد بیان شده توسط شاخص‌های عملکرد خاص (مانند هزینه، کیفیت، انعطاف‌پذیری، زمان) به مقادیر مناسب متغیرهای تصمیم‌گیری که طراحی فیزیکی یا نحوه عملکرد سیستم تولیدی را توصیف می‌کنند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادبیات دانشگاهی، طراحی کلی سیستم تولیدی به زیرمسئله‌ای پیچیده‌گی قابل مدیریت تجزیه می‌شود (کرایسولورس، ۱۹۹۲). برای این منظور، تصمیم‌گیری در مورد مقدار مناسب منابع منفرد (که ما آنها را به عنوان یک اصطلاح جمعی از کارگران انسانی، ماشین‌آلات و ایستگاه‌ها در نظر می‌گیریم) مورد نیاز است (تصمیمات مربوط به ظرفیت). ارزیابی موازنه بین منابع با انعطاف‌پذیری‌های مختلف در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است (احمد و ساهینیدیس، ۲۰۰۸؛ گایمون و سینگال، ۱۹۹۲). متعاقباً، منابع باید در کارگاه قرار گیرند (تصمیمات مربوط به چیدمان). در این موارد، تصمیمات مربوط به نوع سیستم جابجایی مواد و اتصال منابع مهم است (آصف‌وزیری و لاپورت، ۲۰۰۵). علاوه بر این، انعطاف‌پذیری باقی‌مانده در سیستم باید برای مونتاژ خاص آن (تصمیمات پیکربندی) مشخص شود (بی و همکاران، ۲۰۰۸). این موارد مربوط به منابع (مثلاً انتخاب حالت‌های ماشین یا آموزش

کارگران) یا سیستم جابجایی مواد (مثلاً دسته‌بندی منابع در یک جریان مواد مشترک) است. علاوه بر این، ممکن است پیش‌بینی تصمیمات مافوق یا مادون مفید باشد. این تصمیمات به تخصیص تقاضای پیش‌بینی شده کل محصول به چندین سایت تولیدی یک شرکت (تصمیمات برنامه‌ریزی تولید). (ملو، نیکل و سالدانها-دا-گاما، ۲۰۰۹). یا اجرای کوتاه‌مدت فرآیندهای تولید (تصمیمات کنترلی) می‌پردازد (هندری و کینگزمن، ۱۹۸۹).

در دهه‌های گذشته، چندین جریان ادبی با توسعه رویکردهای طراحی برای سیستم‌های تولیدی برای پارادایم‌های مختلف تولیدی با هدف ایجاد تعادل بین کارایی و انعطاف‌پذیری مرتبط بوده‌اند که مشهورترین آنها سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر (FMS)، سیستم‌های تولیدی سلولی (CMS) و سیستم‌های تولیدی قابل پیکربندی مجدد (RMS) هستند. با این حال، این جریان‌های ادبی به صورت جداگانه به ویژگی‌هایی که در ابتدا معرفی کرده‌اند اشاره می‌کنند و اصطلاحات متفاوتی را حفظ می‌کنند. فقدان بررسی یکسان این رویکردها همچنین در مرور کلی بررسی‌های ادبی مرتبط، که عمدتاً بر اساس جریان‌های ادبی تقسیم شده‌اند (به جدول ۱ مراجعه کنید) منعکس شده است. بنابراین، تشخیص انواع مختلف انعطاف‌پذیری که رویکردها حفظ می‌کنند، کار ساده‌ای نیست. یک طرح طبقه‌بندی برای طبقه‌بندی رویکردهای طراحی برای سیستم‌های تولیدی به شدت مورد نیاز است تا رویکردهای جریان‌های ادبی FMS، CMS و RMS را متحد کند و مبنای مشترکی برای در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم تولیدی فراهم کند. از آنجایی که تمرکز بر سیستم‌های تولیدی منفرد است، مقالات مربوط به انعطاف‌پذیری در زنجیره‌های تأمین در محدوده این مقاله گنجانده نشده‌اند.

جدول ۱. بررسی‌هایی در مورد طراحی FMS، CMS و RMS با استفاده از رویکردهای تحقیق در عملیات.

هدف	جریان	سال	نویسنده (گان)
بررسی مدل‌های تحلیلی برای طراحی FMS	اف ام اس	۱۹۸۶	بوزاکات و یائو
بررسی مدل‌های تحلیلی برای طراحی FMS	اف ام اس	۱۹۸۶	کوسیک
بررسی مشکلات برنامه‌ریزی برای طراحی FMS	اف ام اس	۱۹۹۳	تمپل‌مایر و کوهن
بررسی مشکلات تشکیل سلول با تمرکز بر فرمولاسیون‌ها و سیستم مدیریت محتوا	سیستم مدیریت محتوا	۲۰۱۰	پاپایوانو و ویلسون
مروری بر توسعه رویکردهای طراحی CMS	سیستم مدیریت محتوا	۲۰۱۳	آسکین
بررسی طراحی RMS سلولی با تمرکز بر رویکردهای بهینه‌سازی	آرام اس	۲۰۱۴	رنزی و همکاران
بررسی RMS، برجسته کردن حوزه‌های کاربردی، آرام اس روش‌شناسی‌های کلیدی و ابزارها	آرام اس	۲۰۱۸	بورتولینی، گالیزیا و مورا
بررسی مقالات مرتبط با مسائل برنامه‌ریزی RMS و روش‌های حل آرام اس آنها	آرام اس	۲۰۲۰	یلز-شاوش و همکاران

از آنجایی که تصمیم‌گیری در طراحی سیستم‌های تولیدی، انواع تصمیمات طراحی را در نظر می‌گیرد و جنبه‌های مختلف مرتبط با عمل ممکن است امکانات تصمیم‌گیرندگان را برای اقدامات محدود کند، با یک حوزه بسیار پیچیده مواجه هستیم که کاربرد روش‌های تحلیلی پیشرفته را ضروری می‌سازد. بنابراین، هدف این مقاله بررسی استفاده از روش‌های تحقیق در عملیات برای تسهیل طراحی سیستم‌های تولیدی با تمرکز بر انواع انعطاف‌پذیری مورد نظر و ویژگی‌های آنها است. این بررسی بر اساس ۱۴۴ مقاله از متون علمی انتخاب شده در یک فرآیند جستجوی سیستماتیک و غربالگری انجام شده است. هدف از این تجزیه و تحلیل، برجسته کردن مرزهای دانش و شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی بالقوه است.

سهم اصلی این بررسی سه جنبه دارد. اول، یکپارچه‌سازی جریان‌های ادبی مجزای قبلی با تمرکز بر انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم تولید را فراهم می‌کند. برای ارائه یک طرح طبقه‌بندی از انواع انعطاف‌پذیری که در جریان‌های ادبی سازگار باشد، چارچوب مفهومی «انعطاف‌پذیری تولید» اقتباس شده است. دوم، روش‌های مرتبط طبقه‌بندی شده و میزان ارزیابی رویکردهای اخیر از تحقیق در عملیات برای پشتیبانی از طراحی سیستم تولید بررسی می‌شود. سوم، این مقاله نقاط خالی را بر اساس تحلیل‌های شرح داده شده قبلی شناسایی می‌کند تا تحقیقات آینده را از دیدگاه‌های عملی و روش‌شناختی هدایت کند.

۲. تحولات عمده انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم تولید

در دهه ۱۹۷۰، شرکت‌های تولیدی به طور فزاینده‌ای با چرخه عمر کوتاه محصول، نوسانات ترکیب محصول و تقاضا و تغییر سریع در فناوری فرآیند مواجه بودند. در آن زمان، الگوهای تولید غالب بر انعطاف‌پذیری یا کارایی متمرکز بودند. از یک سو، سیستم‌های تولیدی اختصاصی در تولید کارآمد محصولات با تنوع کم و بهره‌برداری از صرفه‌جویی‌های مقیاس تخصص داشتند؛ با این حال، تخصص آنها مانع از انعطاف‌پذیری بالا می‌شد (گوپتا و گوپال، ۱۹۸۹؛ کورن و همکاران، ۱۹۹۹). از سوی دیگر، از کارگاه‌های تولید برای ارائه محصولات متنوع به صورت انعطاف‌پذیر استفاده می‌شد. با این حال، افزایش ترکیب محصول منجر به کاهش بیشتر کارایی کارگاه‌های تولید شد (گرین و سادوفسکی، ۱۹۸۴).

برای افزایش کارایی و انعطاف‌پذیری در سیستم‌های تولیدی، الگوی تولید سیستم‌های تولید سلولی بر اساس مفهوم فناوری گروهی توسط بوربیج (۱۹۷۵) ایجاد شد. به‌طور کلی، فناوری گروهی به طبقه‌بندی، گروه‌بندی و متحد کردن مفاهیم، عملیات یا فناوری‌های مشابه برای بهره‌برداری از نزدیکی آنها در رابطه با ویژگی‌های از پیش تعریف شده اشاره دارد (گرین و سادوفسکی، ۱۹۸۴؛ سینگ، ۱۹۹۳). در CMS، از فناوری گروهی برای تقسیم فیزیکی منابع یک سیستم تولیدی به سلول‌های جداگانه (تشکیل سلول) و تقسیم منطقی محصولات به خانواده‌های محصول بر اساس شباهت آنها در طراحی و عملیات تولیدی مورد نیاز (گروه‌بندی خانواده محصول) استفاده می‌شود. متعاقباً هر خانواده محصول به یک سلول تولیدی اختصاص داده می‌شود. با گروه‌بندی منابع مکمل برای تولید خانواده محصول، جابجایی مواد بین سلولی کاهش می‌یابد، کنترل عملیات افزایش می‌یابد و زمان‌های راه‌اندازی و موجودی کار در حال انجام کاهش می‌یابد (گرین و سادوفسکی، ۱۹۸۴؛ آفودایل، مهرز و گرزنار، ۱۹۹۴؛ سینگ، ۱۹۹۳؛ استنها و هولیر، ۱۹۸۴). برخلاف سیستم‌های تولیدی اختصاصی، CMS امکانات بیشتری را برای بهره‌برداری از انعطاف‌پذیری اجزای

سیستم تولیدی ارائه می‌دهد. در نتیجه، تحقیقات قابل توجهی برای استخراج طرح‌های مفید بر اساس الگوی CMS انجام شد. برای مرور جامع روش‌های اولیه تحقیق در عملیات که از طراحی CMS پشتیبانی می‌کنند (سینگ، ۱۹۹۳). در عین حال، با انگیزه پیشرفت در تکنیک‌های کنترل کامپیوتری و عددی، گروه‌های تحقیقاتی مستقل روش‌های دیگری را برای غلبه بر کمبود انعطاف‌پذیری در سیستم‌های تولیدی اختصاصی ارائه دادند. ویلیامسون (۱۹۶۸) و وین و هاجینسون (۱۹۷۴) محدودیت‌های سیستم‌های تولیدی اختصاصی و کارگاه‌های تولید را بررسی کردند و کنترل عددی را برای گسترش ارتباط و کنترل در سیستم‌های تولیدی پیشنهاد دادند. در نتیجه، آنها توسعه الگوی تولید سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر را پیش بردند. FMS شامل مجتمع‌های یکپارچه و کنترل‌شده توسط کامپیوتر از دستگاه‌های جابجایی خودکار مواد و ابزارهای ماشینی برای پردازش همزمان انواع مختلف محصول است. برای فعال کردن پردازش انواع مختلف محصول، ماشین‌ها به محفظه‌های ابزار مجهز شده‌اند که امکان تعویض خودکار ابزار را بدون زمان راه‌اندازی قابل توجه فراهم می‌کنند و در ایستگاه‌های استاندارد کار می‌کنند. بنابراین، FMS با ترکیب درجه بالایی از اتوماسیون، هزینه‌های نیروی کار و زمان‌های تحویل را در مقایسه با کارگاه‌های تولید کاهش می‌دهد و در عین حال کارایی سیستم‌های تولیدی اختصاصی را حفظ می‌کند (براون و همکاران، ۱۹۸۴).

الگوی تولید سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر برای خدمت‌رسانی به تولید حجم‌های متوسط از انواع محصولات توسعه داده شده است. تغییرات در تقاضا و انواع محصول، از قبل در مرحله طراحی FMS با پیاده‌سازی تمام ماشین‌آلات و ابزارهای کنترل عددی مورد نیاز، پیش‌بینی می‌شوند. اجزا به شدت به هم مرتبط هستند و قابلیت‌های تغییرات بعدی را از نظر عملکرد یا ظرفیت محدود می‌کنند. بنابراین، الگوی FMS انعطاف‌پذیری عمومی را حفظ می‌کند (المراغی، ۲۰۰۵). انعطاف‌پذیری عمومی اغلب به طور کامل مورد استفاده قرار نمی‌گیرد زیرا سیستم‌ها فقط یک بار بر اساس پیش‌بینی‌ها طراحی می‌شوند و پس از آن تنظیم نمی‌شوند. با توجه به سرمایه‌گذاری اولیه بالا برای این سیستم‌ها و عدم امکان تنظیم، اهداف انعطاف‌پذیری و کارایی باید با دقت در برابر یکدیگر متعادل شوند (گاپتا و گوپال، ۱۹۸۹). در نتیجه، تحقیقات قابل توجهی برای تعیین سطوح «مناسب» انعطاف‌پذیری و کارایی در طراحی FMS انجام شد. برای مرور جامع روش‌های اولیه تحقیق در عملیات که از طراحی FMS پشتیبانی می‌کنند (کوهن، ۱۹۹۳). در دهه ۱۹۹۰، طراحی به کمک کامپیوتر به طور چشمگیری زمان توسعه محصول را کاهش داد و منجر به کوتاه‌تر شدن چرخه عمر محصول، تقاضای پویا برای محصول و افزایش امکان سفارشی‌سازی محصول شد. اگرچه انعطاف‌پذیری عمومی را فراهم می‌کرد، اما قابلیت‌های محدود ارتقاء یا پیکربندی مجدد FMS محدودیت‌های شدیدی را برای دنبال کردن کارآمد تغییرات بازار اعمال می‌کرد. در نتیجه، یک الگوی تولیدی جدید مورد نظر بود (بورولینی و مورا، ۲۰۱۸). در این زمینه، کارن و همکاران (۱۹۹۹)، سیستم‌های تولیدی قابل پیکربندی مجدد را معرفی کرد RMS. را می‌توان به عنوان سیستم‌های تولیدی تعریف کرد که امکان اضافه کردن، حذف کردن، تعویض یا اصلاح اجزای تولیدی (یعنی ماشین‌ها، کارگران، ایستگاه‌ها یا واحدهای جابجایی مواد قابل پیکربندی مجدد) را برای پاسخ به تحولات خارجی در حال تغییر ارائه می‌دهند (المراغی، ۲۰۰۵). برخلاف معماری یکپارچه FMS که شناسایی و جداسازی اجزای سیستم تولیدی را پیچیده می‌کند، RMS معماری‌ای را پیشنهاد می‌کند که تغییر اجزای منفرد را تسهیل می‌کند، عمدتاً با تکیه بر ابزارهای ماشینی مدولار و سیستم‌های معماری نرم‌افزار باز است. بنابراین، RMS با ارائه معماری‌ای که امکان پیکربندی مجدد مکرر سیستم تولیدی را برای مقابله بهتر با تحولات خارجی در حال تغییر فراهم می‌کند، بر امکانات

محدود تنظیم FMS غلبه می کند (کارن و همکاران، ۱۹۹۹). به جای ارائه انعطاف پذیری عمومی تا حد زیادی در طول مرحله طراحی، انعطاف پذیری سفارشی را از طریق پیکربندی مجدد سیستم تولیدی برای تطبیق سطح «مناسب» انعطاف پذیری در صورت نیاز فراهم می کند. این توسعه، تمرکز تحقیقات بر تعیین سطوح «مناسب» انعطاف پذیری طراحی اولیه را به پیکربندی مجدد سیستم های تولیدی گسترش داد که امکان بررسی انعطاف پذیری در طول زمان را فراهم می کند. برای مرور جامع روش های تحقیق در عملیات که از طراحی RMS پشتیبانی می کنند (یلس و همکاران، ۲۰۲۰).

در دهه ۲۰۱۰، سیستم های تولیدی به سمت درجه بالاتری از اتوماسیون در حال تکامل بودند. تحت عنوان کلی صنعت ۴،۰ یا تولید هوشمند، چندین فناوری جدید ظهور کردند که اجزای سیستم های تولیدی را با حسگرها، پلتفرم های محاسباتی پیشرفته و فناوری ارتباطات ادغام کردند (کوسیاک، ۲۰۱۸). هدف از پیشرفت های فناوری، ادغام سطح بالاتری از اتوماسیون در فرآیندهای تولیدی برای دستیابی به راندمان بالا با اتصال سیستم تولید فیزیکی و اجزای آن به فناوری های مجازی و در نتیجه تشکیل سیستم های سایبری-فیزیکی است (الکاگر و کرازماچادو، ۲۰۱۹). استفاده از این فناوری ها برای ارائه کاهش هزینه بالقوه ۱۰ تا ۲۰ درصدی در تولید و لجستیک ترویج می شود (بوناسال، ۲۰۱۷). اگر این ارزیابی درست باشد، می توان از پتانسیل های جدیدی برای افزایش انعطاف پذیری و کارایی تولید استفاده کرد. علاوه بر این، تکنیک های جدید تولید، مانند تولید افزایشی یا ربات های مشارکتی، جایگزین هایی برای منابع مورد استفاده فعلی ارائه می دهند. در این حوزه، کاربرد و تعامل همزمان فناوری های مختلف می تواند هم افزایی در افزایش عملکرد فناوری را به سطحی بالاتر از استفاده انفرادی آنها تسهیل کند (فلین و همکاران، ۲۰۱۶). بسته به ویژگی های فناوری های مورد بررسی، مسائل بهینه سازی بیشتری می توانند در مسائل طراحی سیستم تولیدی ایجاد شوند. این امر، به عنوان مثال، در استفاده از ربات های مشارکتی در مونتاژ، که در آن مسائل زمان بندی با محدودیت منابع چند حالت به مسئله اصلی در هم تنیده اند، مشهود است (سیکورا و وکنبورگ، ۲۰۲۳). با توجه به پیچیدگی فزاینده سیستم های تولید صنعتی و سبب رو به رشد فناوری ها و داده های موجود، تسلط بر انعطاف پذیری ارائه شده توسط آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، روش های تحلیلی پیشرفته جایگاه بالایی را حفظ می کنند. پژوهش حاضر در ارائه درک مشترکی از انعطاف پذیری در طراحی سیستم تولیدی، به این حوزه خدمت می کند.

۳. روش پژوهش

یک رویکرد سیستماتیک برای اطمینان از جامعیت و به حداقل رساندن سوگیری احتمالی در مورد شناسایی، انتخاب و تجزیه و تحلیل مقالات مرتبط اعمال شد (تیس و همکاران، ۲۰۱۹). این روش شامل چهار مرحله است. ابتدا، جستجوی پایگاه داده در اکتبر ۲۰۲۱ انجام شد و در دسامبر ۲۰۲۲ با استفاده از پایگاه داده Scopus الزویر (www.scopus.com) به روزرسانی شد، که پوشش گسترده ای از ادبیات علمی بررسی شده توسط همتا و یک رابط پیشرفته برای تجزیه و تحلیل دقیق و صادرات داده ها را ارائه می دهد. رشته جستجوی چند سطحی از کلمات کلیدی تشکیل شده است که به موضوع و زمینه این بررسی (یعنی انعطاف پذیری در طراحی سیستم تولید) و همچنین مجموعه خاصی از روش ها در حوزه تحقیق در عملیات (به عنوان مثال، بهینه سازی، اکتشافی، الگوریتم ها) می پردازند. رشته جستجو با استفاده از متغیرهای تک کاراکتری (مثلاً «optimization» برای پوشش «optimization» و «optimisation» و متغیرهای چند کاراکتری مثلاً «heuristic» برای پوشش «heuristic» ،

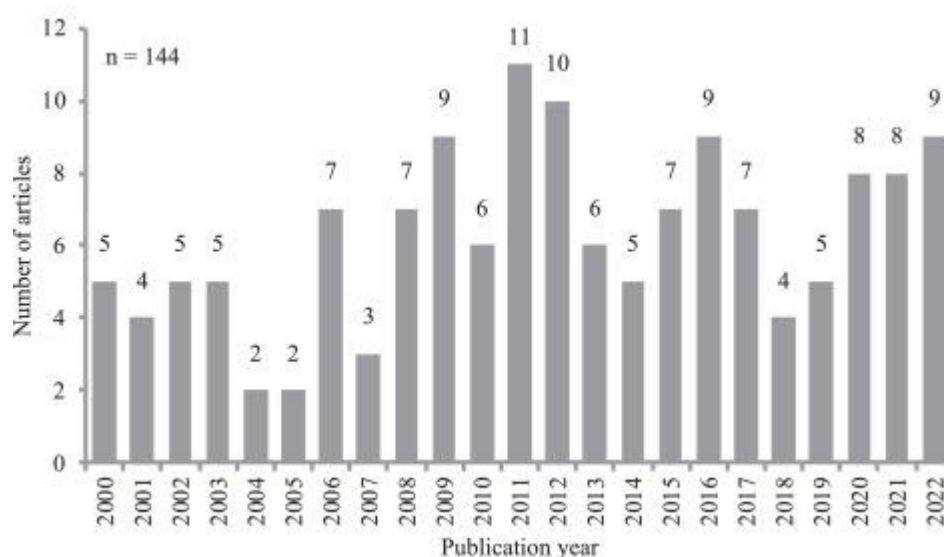
«matheuristic» و «metaheuristic» در برابر املای جایگزین محافظت می‌کند. علاوه بر این، عملگرهای مجاورت کلمات کلیدی نزدیک به یکدیگر را شناسایی می‌کنند مثلاً «flexib* W/2 *design» برای ارائه «[...] طراحی انعطاف‌پذیر [...]» یا «[...] انعطاف‌پذیری در طراحی». «[...]» برای تمرکز بر انتشارات اخیر، فقط مقالات منتشر شده در این هزاره در نظر گرفته شده‌اند.

در مرحله بعد، نتایج حاصل از جستجوی پایگاه داده، تحت یک فرآیند غربالگری دو مرحله‌ای قرار گرفتند تا مقالاتی که به این بررسی مرتبط نبودند، حذف شوند. این موارد مربوط به معیارهای رسمی (یعنی کیفیت ناکافی مجله، چارچوب‌های مفهومی و بررسی‌های ادبیات، مقالاتی که توسعه نرم‌افزار را توصیف می‌کنند) یا معیارهای مرتبط با محتوا (مثلاً دامنه محدود به برنامه‌ریزی و کنترل تولید، تمرکز بر زنجیره تأمین و شرکت) است. غربالگری عناوین، چکیده‌ها و فراداده‌ها، امکان حذف بسیاری از مقالات را فراهم کرده بود. مقالات باقیمانده تحت غربالگری متن کامل قرار گرفتند که در آن مقالات بیشتری حذف شدند. علاوه بر این، چندین مقاله اضافی که در منابع مقالات غربالگری شده شناسایی شده و مرتبط تلقی می‌شدند، در این مرحله گنجانده شدند.

در نهایت، ۱۴۴ مقاله موجود در پایگاه داده بررسی با استفاده از یک صفحه گسترده ساختاریافته برای استخراج داده‌های مرتبط مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. از همه مهم‌تر، زمینه مسئله خاص هر مقاله، الگوی تولید، هدف، انواع انعطاف‌پذیری مورد نظر و محدودیت‌های کاربردی که از آنها رنج می‌برند، تصمیمات به تصویر کشیده شده در مدل‌های ریاضی و روش‌های تحقیق در عملیات کاربردی و رویکردهای راه‌حل جمع‌آوری شدند.

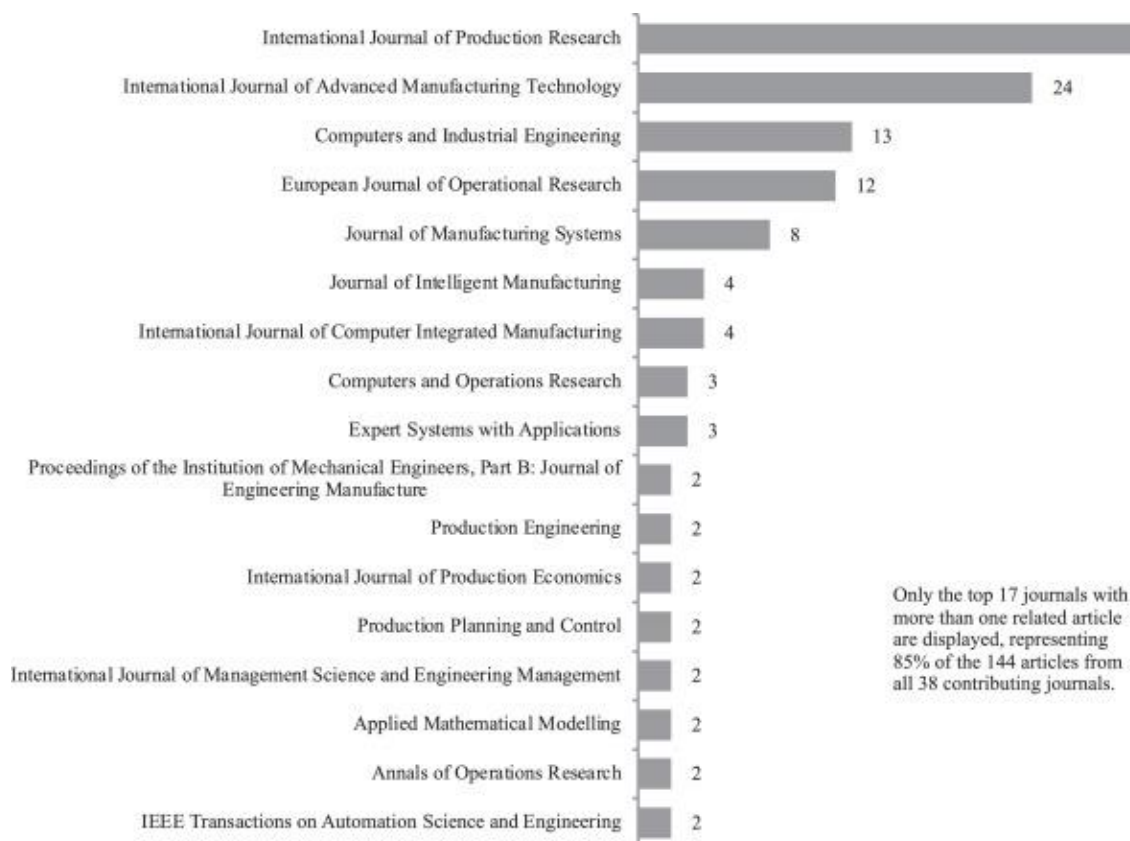
۴. تحلیل توصیفی پایگاه داده بررسی

این بخش، اطلاعات کلی در مورد مقالات موجود در پایگاه داده بررسی را برای تحلیل توصیفی گردآوری می‌کند و به خروجی انتشارات در طول زمان و مکان‌های انتشار بسیار پرتکرار اشاره دارد. علاوه بر این، بینش‌های اولیه در مورد زمینه مسئله مقالات با توجه به درجه قطعیت و مرجع زمانی، اهداف دنبال شده و روش‌های مورد استفاده ارائه می‌شود. شکل (۱) تعداد مقالات این بررسی را بر اساس سال انتشار نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم تولید در طول ۲۰ سال گذشته توجه مداومی را به خود جلب کرده است. ۲۸ مقاله از ۱۴۴ مقاله این بررسی با الگوی تولید FMS، ۲۹ مقاله با الگوی تولید RMS و ۸۲ مقاله را می‌توان به الگوی تولید CMS نسبت داد.



شکل ۱. توزیع مقالات بر اساس سال انتشار.

ادغام روش‌های تحقیق در عملیات در رویکردهای طراحی سیستم‌های تولیدی با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری، عمدتاً از جامعه تحقیقات تولیدی نشأت گرفته است، همانطور که از تجزیه و تحلیل مجلات مشارکت‌کننده می‌توان نتیجه گرفت. ۱۴۴ مقاله در ۳۸ مجله مشارکت‌کننده یافت شد. در حالی که ۱۷ مجله بیش از یک مقاله منتشر کردند، ۲۱ مجله هر کدام یک مقاله منتشر کردند. در میان ۱۷ مجله برتر، هفت مجله طبق رتبه‌بندی مجله Scimago SJR 2021 به حوزه علوم مدیریت و تحقیقات عملیاتی تعلق دارند، یعنی مجله بین‌المللی تحقیقات تولید، مجله اروپایی تحقیقات عملیاتی، کامپیوترها و تحقیقات عملیاتی، مجله بین‌المللی اقتصاد تولید، سالنامه تحقیقات عملیاتی، برنامه‌ریزی و کنترل تولید و مجله بین‌المللی علوم مدیریت و مدیریت مهندسی. با مجموع ۱۲ مقاله، مجله اروپایی تحقیقات عملیاتی در بین چهار مجله برتر مشارکت‌کننده قرار دارد که توسط مجله بین‌المللی تحقیقات تولید (۳۶ مقاله)، مجله بین‌المللی فناوری پیشرفته تولید (۲۴ مقاله) و کامپیوترها و مهندسی صنایع (۱۳ مقاله) پشت سر گذاشته شده است. بنابراین، طراحی سیستم‌های تولیدی با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری، زمینه مهمی برای رویکردهای علم مدیریت و تحقیق در عملیات در ارتباط با حوزه‌های مهندسی است.



شکل ۲. توزیع مقالات بر اساس مجلات بین‌المللی

روش‌های مختلف تحقیق در عملیات برای حل مسائل طراحی سیستم تولیدی مرتبط استفاده می‌شوند. در میان روش‌های دقیق، رویکردهای برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، عدد صحیح و دودویی عدد صحیح بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به ترتیب در ۴۷، ۳۰ و ۲۹ مقاله استفاده شده‌اند. الگوریتم‌های اکتشافی عمدتاً به فراابتکاری‌ها به عنوان چارچوب‌های الگوریتمی مستقل از مسئله اشاره دارند که دستورالعمل‌هایی برای توسعه الگوریتم ارائه

می‌دهند. الگوریتم‌های تکاملی و شبیه‌سازی تبرید بیشترین کاربرد را دارند و به ترتیب ۴۵ و ۲۳ مورد را شامل می‌شوند. رویه‌های ساخت و بهبود ذکر شده در جدول به رویکردهای مستقل اشاره دارند، یعنی روش‌هایی از این نوع که در فراابتکاری‌ها استفاده می‌شوند، در تعداد رویه‌های ساخت و بهبود دوباره در نظر گرفته نمی‌شوند. جدول ۲. تعداد مقالاتی که از روش‌های دقیق و اکتشافی استفاده کرده‌اند.

وقایع	روش‌های اکتشافی	رخدادها	روش‌های دقیق
۴۵	الگوریتم تکاملی	۴۷	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط
۲۳	آنیلینگ شبیه‌سازی شده	۳۰	برنامه‌ریزی عدد صحیح
۲۴	روش سازنده اکتشافی	۲۹	برنامه‌ریزی عدد صحیح دودویی
۱۵	روش بهبود اکتشافی	۲	شاخه و مرز
۷	بهینه‌سازی ازدحام ذرات	۲	برنامه‌نویسی پویا
۴	جستجوی ممنوعه	۲	برنامه‌ریزی هدف
۲	بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها	۲	برنامه‌ریزی نیمه‌قطعی
۲	جستجوی پراکنده	۱	تجزیه بندرز
۱	روش جستجوی تطبیقی تصادفی حریصانه		
۱	یادگیری ماشین		

با کمال تعجب، ۲۳ مقاله از ۱۴۴ مقاله موجود در پایگاه داده بررسی، روش‌هایی را که توسعه می‌دهند، به اشتباه طبقه‌بندی می‌کنند. این امر عمدتاً در مورد رویکردهای برنامه‌ریزی عدد صحیح یا دودویی صدق می‌کند که نویسندگان، علیرغم عدم وجود متغیرهای پیوسته، آنها را به عنوان برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط طبقه‌بندی می‌کنند.

۵. توجه به انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم‌های تولیدی

این بخش، ادبیات موجود در پایگاه داده بررسی را بر اساس انواع انعطاف‌پذیری و ویژگی‌های مورد نظر آنها طبقه‌بندی می‌کند. برای این منظور، مفهوم انعطاف‌پذیری تولید در بخش ۵،۱ معرفی و تطبیق داده شده است که جریان‌های مختلف ادبیات را در تجزیه و تحلیل متحد می‌کند. انواع انعطاف‌پذیری شناسایی شده به دو مجموعه از انواع انعطاف‌پذیری نسبت داده می‌شوند که تحلیل‌ها را هدایت می‌کنند (انواع انعطاف‌پذیری پایه، انواع انعطاف‌پذیری سیستم). بر این اساس، بینش‌هایی در مورد بررسی و مدیریت انواع انعطاف‌پذیری پایه توسط رویکردها در بخش‌های ۵،۲ تا ۵،۵ ارائه شده است و انواع انعطاف‌پذیری سیستم در بخش‌های ۵،۶ تا ۵،۸ مورد بحث قرار گرفته‌اند. این بخش‌ها در ابتدا ادبیات را توصیف می‌کنند. متعاقباً، رویکردهای مرتبط با تحقیق در عملیات با تمرکز ویژه بر تصمیمات، اهداف، روش‌های بهینه‌سازی و در نظر گرفتن عدم قطعیت مورد بحث قرار می‌گیرند. در نهایت، موضوعات نوظهور شناسایی می‌شوند.

۵,۱ طرح طبقه‌بندی برای انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم‌های تولیدی

طبق گفته کیکرت (۱۹۸۴)، انعطاف‌پذیری یک سیستم، قابلیت انطباق آن با طیف وسیعی از محیط‌های ممکن است که ممکن است با آن مواجه شود. در نتیجه، یک سیستم انعطاف‌پذیر باید قادر به تغییر برای مقابله با تغییرات محیطی باشد. با توجه به افزایش تنوع محصولات و کوتاه شدن چرخه عمر محصولات که قبلاً به آن اشاره شد، چنین ضرورتی به طور فزاینده‌ای مطرح می‌شود و به ویژه به مراحل تولید شرکت‌های تولیدی مربوط می‌شود. در این زمینه، انعطاف‌پذیری تولید را می‌توان به عنوان توانایی یک سیستم تولیدی برای تنظیم منابع تولیدی جهت مقابله با شرایط متغیر ناشی از محیط تعریف کرد (گوپتا و گوپتا، ۱۹۸۹؛ ستی و ستی، ۱۹۹۰). بدون هیچ گونه یا تنها با چند مورد جریمه در زمان، هزینه یا عملکرد (داس، ۲۰۰۱؛ آپتون، ۱۹۹۴). بنابراین، در ادامه این مقاله، انعطاف‌پذیری تولید به عنوان ویژگی ماشین‌آلات، کارگران، ایستگاه‌ها (که ما در مجموع به عنوان منابع از آنها یاد می‌کنیم) و سیستم‌های جابجایی مواد سیستم‌های تولیدی در نظر گرفته می‌شود که به طور یکپارچه طراحی و به یکدیگر متصل شده‌اند تا در برابر محیط‌های تولیدی مختلف مقاومت کنند. برای این منظور، انعطاف‌پذیری تولید شامل ترکیبی از انواع مختلف انعطاف‌پذیری است که در سیستم تولیدی مربوط به جنبه‌هایی از منابع، سیستم جابجایی مواد و محصولات، همزیستی و تعامل دارند. ماهیت انتزاعی انعطاف‌پذیری تولید و انواع انعطاف‌پذیری موجود در آن، نشان‌دهنده‌ی ماهیت پیچیده و چندبعدی این اصطلاحات است. در نتیجه، ادبیاتی که این مفاهیم را بررسی می‌کند، تعاریف و طبقه‌بندی‌های مبهم انواع انعطاف‌پذیری تشکیل‌دهنده‌ی انعطاف‌پذیری تولید را مورد بحث قرار داده است. بیش از ۵۰ اصطلاح برای انواع انعطاف‌پذیری از مشارکت‌های طبقه‌بندی یا مفهومی مختلف در مفهوم انعطاف‌پذیری تولید سرچشمه می‌گیرند و از دیدگاه‌های مختلف و با دامنه‌های جایگزین به آن می‌پردازند (پرز پرز، سرانو بدیا و لویز فرناندز، ۲۰۱۶؛ ستی و ستی، ۱۹۹۰). پرز پرز و همکاران (۲۰۱۶) کامل‌ترین و شناخته‌شده‌ترین طبقه‌بندی انواع انعطاف‌پذیری را در زمینه‌ی انعطاف‌پذیری تولید ارائه می‌دهند. در مجموع، ۶۲ مقاله طبقه‌بندی در نظر گرفته شده است، ۲۶ نوع انعطاف‌پذیری مختلف تعریف شده است و تعاریف مورد اجماع، انواع انعطاف‌پذیری و اصطلاحات مرتبط با جریان‌های مختلف ادبیات را متحد می‌کند. برای این پژوهش، درک کلی از انعطاف‌پذیری تولید و انواع انعطاف‌پذیری برای یکپارچه‌سازی ادبیات مربوط به پارادایم‌های مختلف تولید مورد نیاز است. برای این منظور، این مقاله بر هشت نوع انعطاف‌پذیری ذاتی در سیستم‌های تولیدی منفرد (یعنی صرف نظر از انعطاف‌پذیری مربوط به زنجیره تأمین یا تأمین‌کنندگان منفرد) تمرکز دارد که مستقیماً با طراحی سیستم تولیدی مرتبط هستند. انواع انعطاف‌پذیری در نظر گرفته شده برای طراحی سیستم‌های تولیدی بر اساس تعریف اجماعی ارائه شده توسط پرز پرز و همکاران (۲۰۱۶) است. آنها در ادامه شرح داده شده و در جدول (۴) خلاصه شده‌اند.

جدول ۴. انواع انعطاف‌پذیری مورد توجه برای طراحی سیستم‌های تولیدی.

توضیحات	مرجع	انواع انعطاف‌پذیری
عملیات‌هایی که ماشین‌ها می‌توانند انجام دهند، منابع زمان پردازش، تحرک ماشین	منابع	انعطاف‌پذیری دستگاه انعطاف‌پذیری پایه‌ای
کارگران عملیاتی می‌توانند انجام دهند، زمان منابع	منابع	انعطاف‌پذیری نیروی

توضیحات	مرجع	انواع انعطاف‌پذیری
پردازش، تحرک کارگران	کار	
جایگزین‌های توالی عملیات	محصولات	انعطاف‌پذیری عملیاتی
گزینه‌های جریان مواد محصولات	سیستم‌های	انعطاف‌پذیری در
	جابجایی مواد	جابجایی مواد
توانایی پاسخگویی به تغییرات تقاضا در ترکیب همه محصولات	همه	انعطاف‌پذیری مخلوط سیستم
امکان گنجاندن محصولات در نظر گرفته نشده همه در ترکیب محصولات	همه	انعطاف‌پذیری محصول
توانایی پاسخگویی به تغییرات در حجم محصول همه (عملیاتی)	همه	انعطاف‌پذیری حجم
توانایی پاسخگویی به تغییرات در حجم محصول همه (تاکتیکی)	همه	انعطاف‌پذیری توسعه

انواع انعطاف‌پذیری به انعطاف‌پذیری‌های پایه استاتیک و انعطاف‌پذیری‌های سیستم پویا طبقه‌بندی می‌شوند. چهار انعطاف‌پذیری پایه، از یک سو، ذاتی منابع سیستم‌های تولیدی، سیستم‌های جابجایی مواد و محصولاتی هستند که باید تولید شوند. بدون در نظر گرفتن صریح آنها، عمدتاً به عنوان منابع کاملاً در دسترس فرض می‌شوند. با این حال، ممکن است با فرضیات محیط تولیدی خاص یا الگوی تولیدی مورد نظر محدود شوند. به عنوان مثال، در طرز فکر متخصصان مدل‌سازی، ممکن است ماشین‌ها به عنوان منابع کاملاً انعطاف‌پذیر و پرسرعتی که کار نامحدودی را می‌طلبند فرض شوند، مگر اینکه ملاحظات آنها محدودیت‌های قابل اجرا را به تفصیل شرح دهد. از سوی دیگر، چهار انعطاف‌پذیری سیستم بر اساس میزان انعطاف‌پذیری‌های پایه موجود فعال می‌شوند و به سیستم تولیدی اجازه می‌دهند در یک محیط پویا واکنش نشان دهد.

انعطاف‌پذیری‌های اساسی در ادامه معرفی می‌شوند. انعطاف‌پذیری ماشین‌آلات به قابلیت‌های ذاتی ماشین‌آلات برای انجام عملیات مختلف در طول فرآیند تولید در زمان‌های پردازش مربوطه اشاره دارد. این انعطاف‌پذیری همچنین توانایی ماشین‌آلات را برای تخصیص و جابجایی در سیستم تولید توصیف می‌کند. بر این اساس، انعطاف‌پذیری نیروی کار به طیف عملیاتی که یک کارگر می‌تواند در زمان‌های پردازش مربوطه انجام دهد و توانایی‌های کارگران برای تخصیص و جابجایی در سیستم تولید اشاره دارد. این انواع انعطاف‌پذیری مربوط به منابع سیستم‌های تولید هستند. انعطاف‌پذیری عملیات، توانایی تغییر توالی عملیات مورد نیاز برای تولید هر محصول در طول فرآیند تولید را توصیف می‌کند. بنابراین، به ساختار محصولات مورد نظر و قابلیت بهره‌برداری از درجات آزادی ذاتی آنها مربوط می‌شود. انعطاف‌پذیری

جابجایی مواد، ذاتی سیستم جابجایی مواد است و توانایی سیستم تولید را برای انتقال قطعات کار بین منابع توصیف می کند.

انعطاف پذیری های اساسی به طور مشترک انواع انعطاف پذیری سیستم پویای زیر را ممکن می سازند. از یک سو، انعطاف پذیری ترکیبی یک سیستم تولیدی به توانایی آن در پاسخگویی سریع و اقتصادی به تغییرات تقاضا در ترکیب محصول فعلی مربوط می شود. از سوی دیگر، انعطاف پذیری محصول، سهولت اضافه یا جایگزینی محصولات جدید از فرآیند تولید فعلی را توصیف می کند. تفاوت بین هر دو نوع انعطاف پذیری بر اساس آشنایی با محصولات مورد نظر در سبد محصول است. در حالی که انعطاف پذیری ترکیبی به تغییر حجم محصول برای محصولات از پیش تعیین شده در سبد اشاره دارد، افزودن محصولات قبلاً بررسی نشده به سبد، نشان دهنده انعطاف پذیری افزایش یافته محصول است. انعطاف پذیری حجم یک سیستم تولیدی، توانایی آن را برای عملکرد اقتصادی در سطوح مختلف خروجی از دیدگاه کوتاه مدت با حفظ طراحی از قبل نصب شده توصیف می کند. بنابراین، به قابلیت بهره برداری از درجات آزادی عملیاتی مربوط می شود. از دیدگاه میان مدت، انعطاف پذیری توسعه، توانایی عملکرد اقتصادی در سطوح مختلف خروجی را توصیف می کند که در آن منابع یا سیستم های جابجایی مواد ممکن است به سیستم موجود اضافه یا از آن حذف شوند. بنابراین، به قابلیت بهره برداری از درجات آزادی تاکتیکی مربوط می شود.

۵,۲ انعطاف پذیری ماشین

۵,۲,۱. توصیف ادبیات

انعطاف پذیری ماشین به قابلیت های ذاتی ماشین ها برای انجام عملیات مختلف در طول فرآیند تولید اشاره دارد. از آنجایی که ۱۴۲ مقاله از ۱۴۴ مقاله پایگاه داده بررسی، ماشین ها را در نظر می گیرند، آنها رایج ترین منبع مورد توجه هستند. بر این اساس، محدودیت های انعطاف پذیری ماشین توجه زیادی را به خود جلب می کند. در مقالات مورد تجزیه و تحلیل، انعطاف پذیری ماشین ها تا حد زیادی محدود شده است و دلایل مختلفی برای آن ذکر شده است. محدودیت های انعطاف پذیری ماشین آلات ممکن است از فرضیاتی در مورد ظرفیت تأمین ماشین آلات و پیش بینی مربوط به میزان استفاده از آنها ناشی شود. بنابراین، انعطاف پذیری ماشین آلات ممکن است با حداکثر زمان مجاز برای هر ماشین و دوره زمانی محدود شود (بورتولین و همکاران، ۲۰۲۱؛ خان، ۲۰۲۲). ۸۹ مقاله از ۱۴۴ مقاله پایگاه داده بررسی، ظرفیت تأمین ماشین آلات را در نظر می گیرند. هنگام بررسی اهداف عملکردمحور، می توان با به حداقل رساندن زمان مورد نیاز برای تولید حجم از پیش تعیین شده ای از محصولات، استفاده زیاد از ماشین آلات را عملی کرد (تانگ و یانگ، ۲۰۰۹). در موارد محدودیت ظرفیت تأمین، زمان های پردازش مرتبط با عملیات مورد نیاز باید در نظر گرفته شوند. زمان های پردازش ممکن است به ترکیب خاص ماشین و محصول بستگی داشته باشد یا یکسان باقی بمانند. علاوه بر این، ماشین ها ممکن است از توانایی محدودی برای اجرای عملیات مختلف محصولات مورد نظر رنج ببرند. انعطاف پذیری ماشین ممکن است به تنها یک عملیات که ماشین ها می توانند اجرا کنند محدود شود (۳ از ۱۴۴ مقاله)، که نشان دهنده تخصص قوی ماشین آلات است (هوانگ و یان، ۲۰۲۰). از طرف دیگر، اگر بتوان بیش از یک عملیات را انجام داد، ماشین ها می توانند چندین هدف را دنبال کنند (۱۴۱ از ۱۴۴ مقاله) (تیرکولی و آیدین، ۲۰۲۱). هنگام ارزیابی میزان حفظ انعطاف پذیری ماشین، بسیاری از مقالات به تضاد بین هزینه ها و انعطاف پذیری اشاره می کنند و این بدهستان را در تصمیمات خود لحاظ می کنند. با انجام این کار، می توان میزان سودمند اقتصادی انعطاف پذیری ماشین را تعیین

کرد. هنگام بررسی ماشین‌هایی با میزان قابلیت‌های مختلف یا زمان‌های پردازش متفاوت، هزینه‌های خرید ماشین (مقدم و همکاران، ۲۰۲۰؛ صفایی و همکاران، ۲۰۰۸؛ سایتو، مالپاتک و کوام، ۲۰۰۲) یا هزینه‌های عملیاتی ماشین ممکن است میزان مرتبط با انعطاف‌پذیری ماشین را در نظر بگیرند (ارزی، بوکچین و ماسین، ۲۰۰۱؛ مهدوی و همکاران، ۲۰۱۰؛ منصور، عفی و طاهاء، ۲۰۲۲).

۵,۲,۲ رویکردهای تحقیق در عملیات

تصمیمات مربوط به انعطاف‌پذیری ماشین‌آلات در درجه اول مربوط به انتخاب تعداد و نوع ماشین‌آلات مورد استفاده در سیستم تولیدی برای دستیابی به سطح تولید مطلوب و دستیابی به اهداف مورد نظر است. در محیط‌های عمدتاً قطعی در پایگاه داده بررسی، قابلیت‌های انجام عملیات و کارایی آنها از نظر زمان پردازش ماشین‌آلات مشخص است و باید در طول طراحی سیستم تولیدی در نظر گرفته شود. انعطاف‌پذیری ماشین‌آلات برای این تصمیمات بسیار مهم است، زیرا باید بین ویژگی‌های اقتصادی (مثلاً سرمایه‌گذاری بالا در ماشین‌آلات با طیف وسیع‌تری از قابلیت‌ها) و ویژگی‌های عملکردی (مثلاً راندمان بالای ماشین‌آلات تخصصی) تعادل برقرار شود. در حالی که بیشتر مقالات به صراحت طبقه فروشگاه را در نظر نمی‌گیرند، ۱۲ مقاله از ۱۴۴ مقاله علاوه بر این، در مورد تعداد ایستگاه‌های موجود تصمیم می‌گیرند و بنابراین فضای مورد نیاز برای استقرار ماشین را در نظر می‌گیرند (ارنی و همکاران، ۲۰۱۵). هر دو تصمیم مربوط به ایستگاه‌ها و ماشین‌آلات ظرفیتی را که سیستم‌های تولید می‌توانند فراهم کنند، تعیین می‌کنند.

مقالات مربوط به انعطاف‌پذیری ماشین‌آلات عمدتاً اهداف اقتصادی را برای به حداقل رساندن هزینه‌های کل ناشی از استقرار ماشین‌آلات دنبال می‌کنند. بنابراین، توجه به جنبه‌های اقتصادی انعطاف‌پذیری ماشین‌آلات به خوبی تثبیت شده است. علاوه بر جنبه‌های اقتصادی، مقالات کمی اهداف عملکردمحور را در نظر می‌گیرند (بنسمین، داهان و بنی یوسف، ۲۰۱۳؛ داس و عبدالقادر، ۲۰۱۱؛ دو، لی و سو، ۲۰۱۶؛ قطب‌الدینی، ربانی و رحیمیان، ۲۰۱۱؛ جوادیان و همکاران، ۲۰۱۱؛ مهدی‌زاده، دایی نیاکی و رحیمی، ۲۰۱۶؛ ساتوخلو و سورش، ۲۰۰۹؛ وانگ، تانگ و یونگ، ۲۰۰۹). اهداف عملکردمحور شامل حداکثرسازی استفاده از ماشین‌آلات، حداقل‌سازی زمان بیکاری ماشین‌آلات و کل زمان تکمیل تولید است. نکته قابل توجه این است که هیچ یک از اهداف اجتماعی یا زیست‌محیطی در نظر گرفته نشده‌اند.

فقط رویکردهای برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) و برنامه‌ریزی عدد صحیح (IP) برای روش‌های بهینه‌سازی دقیق اعمال شده پیشنهاد شده‌اند. نکته قابل توجه این است که روش‌های بهینه‌سازی دقیق اغلب با یک رویکرد اکتشافی اضافی برای حل نمونه‌های مسئله بزرگ ترکیب می‌شوند.

چندین مقاله، طراحی اقتصادی CMS را هنگام تصمیم‌گیری در مورد انتخاب ماشین بررسی می‌کنند. لوگندران و سیریکرای (۲۰۰۰) با فرمول‌بندی یک IP و پیشنهاد شش اقتباس از جستجوی ممنوعه (TS)، تصمیمات مربوط به پیمانکاری فرعی را ادغام می‌کنند. جایاسوال و عادل (۲۰۰۴) یک IP فرمول‌بندی می‌کنند و یک الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA) را با یک روش اکتشافی جستجوی محلی یکپارچه اعمال می‌کنند. آنها با فعال کردن خریدهای تکراری ماشین برای تسهیل مسیرهای اضافی در طول تولید، انعطاف‌پذیری ماشین را از نظر اقتصادی ارزیابی می‌کنند. جوادی و همکاران (۲۰۱۳) علاوه بر این، در مورد تعداد ایستگاه‌های باز تصمیم می‌گیرند. در رویکرد آنها، ماشین‌هایی با ابعاد مختلف در ایستگاه‌ها گروه‌بندی می‌شوند. بنابراین، آنها در مورد ابعاد ایستگاه‌ها بر اساس ماشین‌های

اختصاص داده شده تصمیم می گیرند. علاوه بر این، ایستگاه‌ها حاوی نقاط تخلیه برای انتقال مواد هستند و می‌توانند در کف کارگاه قرار گرفته و جهت‌گیری شوند. یک MIP برای ترسیم و حل این مشکل ارائه شده است. با این حال، این رویکرد فقط برای حل نمونه‌های کوچک مناسب است و هیچ روش اکتشافی ارائه نشده است. ارنا و همکاران (۲۰۱۵). همچنین در مورد تعداد ایستگاه‌های باز شده و تخصص آنها تصمیم می‌گیرند، زیرا می‌توانند به یک یا چند محصول اختصاص داده شوند. نویسندگان یک IP را تدوین کرده و یک روش ابتکاری چند مرحله‌ای توسعه می‌دهند. رحیمی، آرکات و فاروقی (۲۰۲۰) یک MIP را پیشنهاد می‌کنند تا به طور همزمان در مورد باز شدن ایستگاه، تعداد و نوع ماشین‌ها و تخصیص عملیات به ماشین‌ها تصمیم‌گیری کنند. چندین روش ابتکاری پیشنهاد شده است.

در مورد رویکردهای RMS، مقالات مختلف طراحی اقتصادی آنها را با در نظر گرفتن انتخاب ماشین بررسی می‌کنند و بنابراین به انعطاف‌پذیری ماشین اشاره دارند. یوسف و المرغی (۲۰۰۶) طراحی خطوط جریان RMS را با استفاده از یک MIP و اعمال یک الگوریتم تکاملی (EA) که تصمیمات دودویی را به متغیرهای پیوسته کدگذاری می‌کند تا راه‌حل‌های سریع‌تری تولید کند، بررسی می‌کنند. یوسف و المرغی (۲۰۰۸) با اعمال یک EA و یک TS، تحقیقات را گسترش می‌دهند. دو، دای و منگ (۲۰۱۰) یک IP را فرموله می‌کنند و یک EA پیشنهاد می‌دهند. اسافی، دلورم و دولگوی (۲۰۱۲) هدف اقتصادی را با در نظر گرفتن تعادل بار کاری ایستگاه‌ها با روش محدودیت E گسترش می‌دهند. آنها یک MIP را فرموله می‌کنند و استفاده از یک روش جستجوی تطبیقی تصادفی حریصانه را پیشنهاد می‌کنند. وانگ و کورن (۲۰۱۲) طراحی خطوط جریان RMS را بررسی می‌کنند و در مورد تعداد ماشین‌های مستقر و انتساب عملیات به ماشین‌ها برای یک RMS با ترتیب سریالی، با در نظر گرفتن روابط تقدم عملیات، تصمیم‌گیری می‌کنند. آنها یک MIP را فرموله می‌کنند و استفاده از EA را برای به حداقل رساندن تعداد ماشین‌های مورد نیاز برای برآورده کردن یک تقاضای از پیش تعیین‌شده پیشنهاد می‌دهند. این تحقیق توسط کورن، وانگ و گو (۲۰۱۷) گسترش یافته است. بنزین، داهان و بنی‌یوسف (۲۰۱۳) یک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب برای انتخاب بهینه ماشین در RMS پیشنهاد می‌کنند. آنها به صورت دو هدفه، با فرض انعطاف‌پذیری کامل در جابجایی مواد در بین ماشین‌های مستقر، به حداقل رساندن هزینه‌های کل سیستم و زمان تکمیل تولید را هدف قرار می‌دهند. به جز بنزین و همکاران (۲۰۱۳)، همه رویکردهای RMS، طراحی خطوط جریان RMS را بررسی می‌کنند، بنابراین انعطاف‌پذیری موجود در جابجایی مواد را تا حد زیادی محدود می‌کنند EA. عمدتاً به عنوان یک رویکرد اکتشافی استفاده می‌شود.

۵,۲,۳ موضوعات نوظهور

مباحث نوظهور مربوط به انعطاف‌پذیری ماشین، روش‌های بهینه‌سازی و محدودیت‌های انعطاف‌پذیری ماشین هستند. در مورد روش‌های بهینه‌سازی، فقط مدل‌ها و روش‌های اکتشافی IP و MIP پیشنهاد شده‌اند که ما آنها را به ماهیت ترکیبی تصمیمات ظرفیت مربوط به انعطاف‌پذیری ماشین نسبت می‌دهیم. با این حال، تصمیمات (عدد صحیح) در مورد استفاده از منابع (مثلاً تعداد ماشین‌های مختلف) و پیش‌بینی (پیوسته) عملکرد سیستم حاصل (مثلاً استفاده از ماشین‌ها، جریان‌های مواد) می‌توانند به طور بالقوه تجزیه شوند. برای چنین مسائلی، الگوریتم‌های تجزیه بندرز با موفقیت اعمال شده‌اند سیکورا، ۲۰۲۱؛ سیکورا و وکنبورگ، ۲۰۲۳). اگر تابع هدف فقط به متغیرهای عدد صحیح بستگی داشته باشد (مثلاً هزینه‌ها بسته به استقرار منابع)، برش‌های ترکیبی بندرز امیدوارکننده در نظر گرفته می‌شوند. استفاده از رویکردهای

تجزیه بندرز بسیار توصیه می‌شود زیرا این امر در مورد تصمیمات ظرفیت چند برابر در طراحی سیستم تولید صدق می‌کند (کوداتو و فیشتی، ۲۰۰۶).

دو فرصت برای در نظر گرفتن محدودیت‌های انعطاف‌پذیری ماشین وجود دارد. اول، تنها تعداد کمی از مقالات در پایگاه داده بررسی، مستقیماً با محدود کردن انعطاف‌پذیری ماشین در طراحی سیستم تولید استاتیک، به عدم قطعیت می‌پردازند. نویسندگان به قابلیت اطمینان ماشین می‌پردازند. با این حال، در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ماشین در رویکردهای استاتیک به طراحی سیستم تولید، پوشش در برابر خرابی را تسهیل می‌کند. برای این منظور، خرابی‌های ماشین را می‌توان از قبل در تصمیمات (مثلاً، تعداد و نوع ماشین‌ها و واگذاری عملیات به ماشین) پیش‌بینی کرد و تأثیر آنها را می‌توان تخمین زد. بنابراین، طراحی قوی سیستم‌های تولیدی تسهیل می‌شود (مولر و همکاران، ۲۰۱۷؛ مولر و همکاران، ۲۰۱۸). دوم، فرصتی در نظر گرفتن زمان‌های از کارافتادگی منظم ماشین‌ها ایجاد می‌شود. گذشته از موارد دیگر، این موارد ممکن است ناشی از تنظیمات یا تمیزکاری‌ها باشند و به دسته‌ها، حجم‌ها، زمان یا توالی عملیات بستگی دارند (استفانودتری و همکاران، ۲۰۱۷). پیش‌بینی این محدودیت‌ها برای انعطاف‌پذیری ماشین می‌تواند ارزش افزوده‌ای را برای جامعه علمی و متخصصان در طراحی سیستم‌های تولیدی فراهم کند.

۵.۳ انعطاف‌پذیری نیروی کار

۵.۳.۱. توصیف ادبیات

مشابه انعطاف‌پذیری ماشین، انعطاف‌پذیری نیروی کار به طیف عملیاتی که کارگران می‌توانند در زمان‌های پردازش مربوطه انجام دهند و توانایی‌های کارگران برای تخصیص و جابجایی در سیستم تولید اشاره دارد. به‌طور کلی، انعطاف‌پذیری نیروی کار تنها در صورتی قابل بررسی است که به‌طور صریح به کارگران پرداخته شود. تنها ۱۵ مقاله از ۱۴۴ مقاله موجود در پایگاه داده بررسی، استفاده از کارگران را در طراحی سیستم تولید در نظر گرفته‌اند. از آنجایی که اکثر این مقالات (۱۳ مقاله از ۱۵ مقاله) هم ماشین‌ها و هم کارگران را در نظر می‌گیرند، به انعطاف‌پذیری ماشین و انعطاف‌پذیری نیروی کار اشاره می‌کنند. با این حال، دو مقاله کارگران را تنها منبع موجود در نظر می‌گیرند و بنابراین انعطاف‌پذیری ماشین را نادیده می‌گیرند (لیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ وایراکتاراکیس جی‌ال، کای ایکس، لی سی-وای، ۲۰۰۲).

در بیشتر موارد، کارگران به‌طور مشابه با ماشین‌ها نمایش داده می‌شوند. بنابراین، انعطاف‌پذیری نیروی کار عمدتاً بر اساس محدودیت‌های کارگران در مورد تأمین ظرفیت (۱۳ از ۱۵ مقاله)، زمان پردازش (۱۵ از ۱۵ مقاله) و توانایی‌ها (۱۵ از ۱۵ مقاله) طبقه‌بندی می‌شود. همانطور که ماشین‌ها ممکن است جایگزین یکدیگر در نظر گرفته شوند، کارگران نیز توسط چندین مقاله جایگزین ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شوند (لیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ وایراکتاراکیس و همکاران، ۲۰۰۲). در رابطه با خلاقیت و مهارت‌های تصمیم‌گیری بالاتر کارگران در مقایسه با ماشین‌ها، برخی مقالات، کارگران را به عنوان منابعی با محدودیت دوگانه در نظر می‌گیرند که برای اجرای عملیات باید با ماشین‌های مناسب جفت شوند (منصور، عفی و طاهّا، ۲۰۲۲؛ رضازاده و همکاران، ۲۰۰۹؛ ساتوخلو و سورش، ۲۰۰۹). تنها یک مقاله با اختصاص قابلیت‌های جداگانه به ماشین‌ها و کارگران، مهارت‌های تصمیم‌گیری کارگران را به‌طور دقیق در نظر می‌گیرد (ژو و همکاران، ۲۰۲۲).

در مورد انعطاف پذیری ماشین آلات، می توان از بده بستان بین میزان انعطاف پذیری نیروی کار حفظ شده و هزینه های سیستم ها برای تعیین درجه ای از انعطاف پذیری نیروی کار که از نظر اقتصادی سودمند است، استفاده کرد. برای کارگران، هزینه های حقوق و دستمزد، هزینه های اضافه کاری کارگران، هزینه های استخدام و اخراج و هزینه های آموزش، کاربردهای فراوانی دارند (گلی، تیرکولایی و آیدین، ۲۰۲۱؛ مهدوی و همکاران، ۲۰۱۰؛ مهدی زاده، دایی نیاکی و رحیمی، ۲۰۱۶).

۵,۳,۲ رویکردهای تحقیق در عملیات

به طور کلی، تنها تعداد کمی از مقالات، کارگران را به عنوان منابعی در طراحی سیستم های تولیدی در نظر می گیرند، اگرچه عملیات تا حد زیادی توسط نیروی انسانی در صنایع مختلف، به عنوان مثال، صنعت خودرو، انجام می شود (هوترات و گراناو، ۲۰۱۹). تصمیمات مربوط به انعطاف پذیری نیروی کار عمدتاً به تخصیص کارگران به ایستگاه های سیستم می پردازد. اغلب، این امر با تصمیماتی در مورد تعداد کارگران یا ایستگاه های مورد استفاده همراه است. مقالات عمدتاً اهداف اقتصادی را دنبال می کنند که در آن هزینه های ترکیبی شامل اجزای ذکر شده در بالا به حداقل می رسد. بنابراین، در نظر گرفتن جنبه های اقتصادی نیروی کار به خوبی تثبیت شده است. تنها دو مقاله به اهداف غیراقتصادی می پردازند. ژو و همکاران (۲۰۲۲) هدفشان به حداقل رساندن زمان تکمیل عملیات و زمان بیکاری کارگران ضمن در نظر گرفتن مهارت های تصمیم گیری آنها در همکاری با ربات های مشارکتی است. بورتولینی و همکاران (۲۰۲۱) به یک هدف اجتماعی می پردازند که در آن نویسندگان قصد دارند با تغییر ماژول های کمکی ماشین ها، تجربه کلی حرکات تکراری کارگران را به حداقل برسانند. با استفاده از شاخص کمکی حرکات تکراری کلی، این رویکرد با هدف به حداقل رساندن فشار ارگونومیک کارگران انجام می شود. با این حال، از آنجایی که حداکثر حد قابل تحمل در نظر گرفته نشده است، نمی تواند تضمین کند که طرح ها در عمل امکان پذیر باشند.

برای روش های بهینه سازی دقیق اعمال شده، عمدتاً رویکردهای برنامه ریزی عدد صحیح (مختلط) پیشنهاد شده اند. مهدوی و همکاران (۲۰۱۰) یک IP برای طراحی اقتصادی CMS پویا فرموله می کنند و در آن کارگران و ماشین ها را به عنوان منابع با محدودیت دوگانه در نظر می گیرند. قطب الدینی، ربانی و رحیمیان (۲۰۱۱) یک MIP فرموله می کنند و در عین حال کارگران را به عنوان منابع با محدودیت دوگانه در نظر می گیرند. برخلاف مهدوی و همکاران (۲۰۱۰)، کارگران به جای ماشین ها به ایستگاه ها اختصاص داده می شوند. علاوه بر این، قطب الدینی، ربانی و رحیمیان (۲۰۱۱) یک رویکرد تجزیه بندر را برای حل مسئله در زمان محاسباتی کوتاه تر پیشنهاد می کنند. برای رویکردهای اکتشافی، ساتوخلو و سورش (۲۰۰۹) یک رویه سه مرحله ای را اعمال می کنند. آنها ابتدا محصولات را بر اساس تقاضایشان به خانواده ها طبقه بندی می کنند. سپس، مسئله گروه بندی ماشین ها را به عنوان یک برنامه هدف عدد صحیح خطی حل می کنند. متعاقباً، کارگران به سلول های از قبل تشکیل شده اختصاص داده می شوند. ژو و همکاران (۲۰۲۲) یک الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیرمغلوب را اعمال می کنند که اهداف کمینه سازی هزینه عملیاتی و کمینه سازی زمان بیکاری را برای یک سیستم تولیدی متشکل از کارگران و ربات های مشارکتی به هم پیوند می دهد. دیپ (۲۰۲۰) یک فراابتکاری ترکیبی را با پیروی از چارچوب فراابتکاری الگوریتم های تکاملی پیشنهاد می کند که در آن نرخ پذیرش راه حل های غیربهبودی را در طول تکرارها کاهش می دهد. برای این منظور، او یک فرآیند آنیلینگ (تبدیل به الگوریتم تبرید) را ادغام می کند.

لازم به ذکر است که تنها یک مقاله به عدم قطعیت‌های مربوط به نیروی کار می‌پردازد. گلی، تیرکولایی و آیدین (۲۰۲۱) زمان پردازش کارگران را به صورت اعداد فازی مثلثی فرض می‌کنند و بنابراین عملکردهای متفاوت کارگران ناهمگن را پیش‌بینی می‌کنند.

۵,۳,۳ موضوعات نوظهور

موضوعات نوظهور مربوط به انعطاف‌پذیری نیروی کار، همکاری و اهداف اجتماعی هستند. چندین مقاله در مورد انعطاف‌پذیری نیروی کار، کارگران را به عنوان منابعی با محدودیت دوگانه مورد نیاز برای کار با ماشین‌آلات در نظر می‌گیرند. در سال‌های اخیر، ادبیات طراحی سیستم تولید، همکاری اختیاری منابع متعدد را به جای همکاری اجباری مورد بحث قرار داده است. کاربردها ممکن است به همکاری چندین کارگر انسانی و ربات‌های مشارکتی در یک کار یکسان اشاره داشته باشند که منجر به هم‌افزایی‌هایی در رابطه با، مثلاً، زمان پردازش کمتر در مقایسه با اجرای انفرادی وظایف توسط هر یک از منابع می‌شود (وکنبورگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ سیکورا و کنبورگ، ۲۰۲۳). این ایده با تولید ترکیبی همسو است، جایی که همکاری چندین ماشین ممکن است سطح عملکرد بالاتری نسبت به ماشین‌های انفرادی داشته باشد (به بخش ۲ مراجعه کنید). از دیدگاه روش‌شناختی، همکاری منابع، ویژگی‌های برنامه‌ریزی اضافی را به مسائل طراحی القا می‌کند، زیرا عملیات نیاز به تخصیص در ایستگاه‌ها در طول زمان دارد. در نظر گرفتن این هم‌افزایی‌های منابع مشارکتی، پتانسیل بیشتری را ارائه می‌دهد و ممکن است فرصت‌های تحقیقاتی هیجان‌انگیزی را برای محققان عملیات در طراحی سیستم تولید ایجاد کند.

در میان مقالات موجود در پایگاه داده بررسی، تنها یک مقاله به عنوان یک هدف اجتماعی در نظر گرفته شده است. در جریان‌های ادبی مجاور، توجه به ارگونومی در طراحی سیستم‌های تولیدی توجه فزاینده‌ای را به خود جلب می‌کند (گانتز، جانسون و پترسون، ۱۹۸۳؛ اتو و شول، ۲۰۱۱؛ وکنبورگ، تیس و اسپنگلر، ۲۰۲۲). با این حال، عدم توجه به انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم‌های تولیدی، کیفیت سیستم‌ها را بیش از حد ارزیابی می‌کند. بنابراین، اکیداً پیشنهاد می‌شود که عوامل انسانی را برای محدود کردن انعطاف‌پذیری نیروی کار تا حد واقع‌بینانه‌ای در نظر گرفت. از دیدگاه مدل‌سازی، ادغام ماهیت پیچیده استرس‌های جسمی و اجتماعی-روانی و فشارهای ناشی از آن می‌تواند فرصت‌های هیجان‌انگیزی را در تقاطع حوزه‌های تحقیق در عملیات و مهندسی فراهم کند.

۵,۴ انعطاف‌پذیری عملیاتی

۵,۴,۱. توصیف ادبیات

انعطاف‌پذیری عملیاتی به محصولات مورد نظر اشاره دارد و درجه آزادی است که ذاتاً به آنها اجازه می‌دهد تا توالی عملیات اجرایی را تطبیق دهند. در مقالات موجود در پایگاه داده بررسی، انعطاف‌پذیری عملیاتی طبق چهار رویکرد مختلف در نظر گرفته شده است که به ترتیب کاهش انعطاف‌پذیری عملیاتی ارائه شده‌اند.

انعطاف‌پذیری عملیات بدون محدودیت و کاملاً در دسترس است اگر نیازی به در نظر گرفتن توالی‌های از پیش تعیین شده بین عملیات‌ها نباشد (۷۳ از ۱۴۴ مقاله). در این حالت، عملیات‌ها می‌توانند به هر ترتیب دلخواهی اجرا شوند (گویال، جین و جین، ۲۰۱۲؛ پوروزیری و همکاران، ۲۰۲۲؛ سونگور و سونگور، ۲۰۰۰). اگر انعطاف‌پذیری عملیات محدود باشد، توالی‌های از پیش تعیین شده عملیات باید در اجرای آنها در نظر گرفته شوند. به طور رسمی، این را می‌توان با روابط تقدمی که توالی‌های اجباری بین تاپل‌های عملیات را توصیف می‌کنند، نشان داد. بر این اساس،

انعطاف پذیری عملیات را می توان با در نظر گرفتن روابط تقدمی بین عملیات ها محدود کرد (۲۵ از ۱۴۴ مقاله). در رویکردهای مرتبط، هر عملیات، عملیات های قبلی و بعدی شناخته شده ای دارد و فقط زمانی می تواند اجرا شود که همه پیشینیان آن از قبل در نظر گرفته شده باشند (لوگندران و سیریکرای، ۲۰۰۰؛ رحیمی، آرکات و فاروقی، ۲۰۲۰؛ وانگ و کورن، ۲۰۱۲). رعایت روابط تقدم، تعداد توالی های ممکن عملیات را محدود می کند و بنابراین انعطاف پذیری عملیات موجود را محدود می سازد. چندین مقاله، انعطاف پذیری عملیات را به مجموعه ای از توالی های از پیش تعیین شده محدود می کنند، بدون اینکه به صراحت روابط تقدم را در نظر بگیرند (۱۱ از ۱۴۴ مقاله). در نتیجه، هر محصول باید به یکی از توالی های از پیش تعیین شده اختصاص داده شود (کامپوس سایونی، دابول و لو دویگو، ۲۰۲۲؛ چانگ، وو و چانگ، ۲۰۱۱؛ سلیمانپور، ورات و شانکار، ۲۰۰۴). در نهایت، اگر عملیات نیاز به اجرای به ترتیب ثابت و از پیش تعیین شده داشته باشند، انعطاف پذیری عملیات ممکن است در دسترس نباشد (۳۵ مقاله از ۱۴۴ مقاله). در این رویکرد، روابط تقدم برای هر محصول به صورت یک ترتیب سریالی عملیاتی می شوند. در نتیجه، هر محصول می تواند دقیقاً مطابق توالی از پیش تعیین شده خود تولید شود (کیا، ۲۰۲۰؛ کیا و همکاران، ۲۰۱۴؛ وانگ، وو و لیو، ۲۰۰۱). لطفاً توجه داشته باشید که این بدان معنا نیست که فقط یک مسیر از پیش تعیین شده و منحصر به فرد برای محصولات از طریق ایستگاه ها وجود دارد.

۵,۴,۲ رویکردهای تحقیق در عملیات

تصمیمات مربوط به انعطاف پذیری عملیات زمانی رخ می دهند که توالی های تولید برای پیش بینی اجرای کوتاه مدت فرآیندهای تولید انتخاب می شوند. اکثر مقالات این تصمیمات برنامه ریزی و کنترل تولید را با تصمیم گیری در مورد یک توالی، برای پیش بینی عملکرد عملیاتی طراحی سیستم تولیدی ادغام می کنند. علاوه بر این، مقالات مختلف به صراحت با انتخاب دنباله های ثابت از مجموعه ای از توالی های از پیش تعیین شده، انعطاف پذیری عملیات را در نظر می گیرند (داس، ۲۰۱۱). عمدتاً، اهداف اقتصادی یا عملکردمحور دنبال می شوند. در مورد اهداف اقتصادی، مطالعات متعددی بر به حداقل رساندن هزینه های کل سیستم تولید یا هزینه های حمل و نقل مواد متمرکز شده اند. از نظر اهداف عملکردمحور، مطالعات با هدف به حداقل رساندن فاصله حمل و نقل انجام می شوند. علاوه بر این، دو مقاله یک هدف اکولوژیکی را در نظر می گیرند (خطابی، بنی یوسف و بوتیچه، ۲۰۲۱؛ لامبا و همکاران، ۲۰۲۰). در این راستا، لامبا و همکاران (۲۰۲۰) مصرف انرژی الکتریکی را در یک هدف مرکب با عبارات هزینه ادغام می کنند. آنها یک برنامه عدد صحیح دودویی (BIP) توسعه می دهند و یک SA را اعمال می کنند. با این حال، ادغام جنبه های اکولوژیکی سطحی باقی می ماند زیرا معیارهایی با واحدهای مختلف (واحدهای پولی (مثلاً یورو) و واحدهای انرژی (مثلاً کیلووات ساعت)) در یک تابع هدف مشترک در نظر گرفته می شوند. خطابی، بنی یوسف و بوتیچه (۲۰۲۱) با دنبال کردن یک رویکرد چند هدفه که کل هزینه های تولید، کل زمان تولید، کل مقدار گازهای گلخانه ای و زباله های مایع خطرناک را به حداقل می رساند، طراحی پایدار RMS را بررسی می کنند. یک BIP و یک الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیر غالب برای ارزیابی اهداف متناقض پیشنهاد شده اند. به طور پسینی، تکنیک مرجع ترتیب بر اساس شباهت به راه حل ایده آل (TOPSIS) اعمال می شود. نکته قابل توجه این است که هر هدف، فاصله حمل و نقل مواد را در نظر می گیرد که نشان دهنده ارتباط قوی انعطاف پذیری عملیات با پیش بینی برنامه ریزی تولید و تصمیمات کنترل است.

در مورد روش‌های بهینه‌سازی، مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح (مختلط) و رویکردهای اکتشافی مختلفی پیشنهاد شده‌اند. رویکردهای مربوط به CMS عمدتاً توالی تولید را از مجموعه‌ای از توالی‌های ثابت تعیین می‌کنند. در سایر الگوهای تولید، توالی‌های تولید کاملاً انعطاف‌پذیر (FMS) فرض می‌شوند، یا روابط تقدم به طور خاص (RMS) در نظر گرفته می‌شوند. سلیمانپور، ورات و شانکار (۲۰۰۴) یک EA پیشنهاد می‌کنند که سرمایه‌گذاری‌ها، زمان پردازش و کارایی گروه‌بندی منابع را به حداقل می‌رساند EA. با استفاده از چندین تابع تناسب اندام با وزن‌های مربوطه برای بررسی مرز بهینه پارتو، فضای راه‌حل را در چندین جهت بررسی می‌کند. چانگ، وو و چانگ (۲۰۱۱) یک BIP را برای نشان دادن طراحی هزینه‌محور CMS فرموله می‌کنند و یک الگوریتم TS را اعمال می‌کنند TS. توسط عملگرهای جهش یک EA برای بررسی فضای راه‌حل گسترش می‌یابد. محمدی و فرقانی (۲۰۱۴) تصمیمات مربوط به پیمانکاری فرعی را در طراحی CMS ادغام می‌کنند و یک EA برای استخراج راه‌حل‌ها پیشنهاد می‌دهند. دفرشا و هودیا (۲۰۱۷) یک MIP و یک SA پیشنهاد می‌دهند که از مسیرهای جستجوی چندگانه موازی برای کاهش زمان محاسبات استفاده می‌کند. کامپوس سایبونی، دابول و لو دویگو (۲۰۲۲) طراحی محصولات ماژولار را در فرآیند طراحی RMS ادغام می‌کنند تا با تقاضای فزاینده برای سفرهای سازی انبوه مقابله کنند. یک BIP و یک EA توسعه داده می‌شوند.

همانند انعطاف‌پذیری ماشین، عدم قطعیت‌های مربوط به انعطاف‌پذیری عملیات با ادغام قابلیت اطمینان ماشین در رویکردها در نظر گرفته می‌شوند. هنگام تصمیم‌گیری در مورد توالی عملیات برای تولید، قابلیت اطمینان ماشین‌های انجام‌دهنده عملیات بسیار مهم است زیرا خرابی ماشین ممکن است از تولید کارآمد جلوگیری کند. در این زمینه، قابلیت اطمینان ماشین به ویژه زمانی در نظر گرفته می‌شود که اهداف عملکرد محور، مانند کمینه‌سازی زمان تکمیل تولید، به حداقل برسند داس و عبدالکادر، (۲۰۱۱).

۵,۴,۳ موضوعات نوظهور

مباحث نوظهور مربوط به انعطاف‌پذیری عملیات، طراحی محصول و پیچیدگی‌های آن است. از آنجایی که انعطاف‌پذیری عملیات به آزادی در تطبیق توالی عملیات اشاره دارد، با طراحی محصول ارتباط نزدیکی دارد. به طور کلی، جامعه تحقیقات عملیاتی به طور گسترده در مورد مسائل مختلف در طراحی محصول تحقیق کرده است. علاوه بر موارد دیگر، این موارد مربوط به تعیین ترکیبی از ویژگی‌های محصول است که مشتریان را جذب می‌کند و سود شرکت‌ها را افزایش می‌دهد (آلبریتون و مک‌مولن، ۲۰۰۷)، یا مبادله هزینه‌های تولید کاهش‌یافته محصولات با اشتراک بیشتر در مقابل کاهش مطلوبیت محصولات توسط مشتریان (کیم و چاجد، ۲۰۰۰). علاوه بر این، مزایا و معایب قابلیت جداسازی بالای محصول با توجه به رقابت بازار ارزیابی می‌شود (وو، ۲۰۱۲). با این حال، این رویکردها دیدگاه زنجیره تأمین یا شرکتی را تسهیل می‌کنند. ارزیابی روابط متقابل بین طراحی محصول و طراحی سیستم تولید مطلوب است. به ویژه ادغام تصمیمات طراحی محصول و طراحی سیستم تولید می‌تواند امیدوارکننده باشد. برای مثال، اگر طراحی محصول از قبل برای افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی محصولات مورد نظر انجام شود و در نتیجه استفاده از توالی‌های عملیاتی مفید در طراحی‌های سیستم تولیدی (یا برعکس) تسهیل شود، ممکن است راه‌حل‌های اقتصادی بهتری یافت شود. برای این منظور، روابط تقدم می‌توانند طراحی محصول را که توالی‌های عملیاتی بالقوه را ایجاد می‌کند و طراحی سیستم تولیدی را که از توالی‌های عملیاتی موجود استفاده می‌کند، پیوند دهند. اولین کار در این زمینه

اخیراً منتشر شده است (باتای و همکاران، ۲۰۱۸؛ کامپوس و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، ادغام رویکردهایی برای تعیین توالی‌های عملیاتی ممکن در رویکردهای طراحی سیستم تولیدی می‌تواند دیدگاه‌های امیدوارکننده‌ای را ارائه دهد (لامبرت، ۲۰۰۶).

علاوه بر این، پیچیدگی‌ها ممکن است بر توالی‌های عملیاتی ممکن تأثیر بگذارند و آنها را تطبیق دهند. علاوه بر موارد دیگر، این پیچیدگی‌ها ممکن است مربوط به بازبینی محصولاتی باشند که نیاز به کار مجدد توسط یک منبع خاص دارند، مثلاً به دلیل عدم موفقیت در انجام وظیفه یا کیفیت متفاوت محصولات ارائه شده. به طور برجسته، عملیات خطرناکی که نیاز به مدیریت ویژه توسط منبع دارند، مورد تأکید قرار گرفته‌اند (بنتاها و همکاران، ۲۰۱۵؛ اوزسیلان و همکاران، ۲۰۱۹). مروری بر پیچیدگی‌های بالقوه توسط اوزسیلان و همکاران (۲۰۱۹) در مثال جداسازی قطعات ارائه شده است. با این حال، اکثر پیچیدگی‌های مورد بررسی می‌توانند به فرآیندهای مونتاژ منتقل شوند و فرصت‌های تحقیقاتی در طراحی سیستم تولید با توجه به انعطاف‌پذیری عملیات فراهم کنند.

۶. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی چگونگی به کارگیری روش‌های تحقیق در عملیات در طراحی سیستم‌های تولیدی با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری می‌پردازد. در ادبیات موجود، چندین الگوی تولیدی به طور مستقل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یک طرح طبقه‌بندی برای متحد کردن ادبیات جریان‌های چندگانه مربوط به انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم تولیدی توسعه داده شده است. یک روش جستجوی سیستماتیک و غربالگری، ۱۴۴ مقاله منتشر شده در این هزاره و مرتبط با این حوزه را شناسایی می‌کند.

از تحلیل آنها، مشاهده می‌شود که بسیاری از روش‌های تحقیق در عملیات برای مقابله با چالش‌های مربوط به انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم تولیدی به کار گرفته می‌شوند. عمدتاً از رویکردهای برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و الگوریتم‌های تکاملی استفاده می‌شود. به طور سنتی، اهداف عملکردگرا (مثلاً حداکثرسازی استفاده از منابع یا حداقل سازی فواصل حمل و نقل) و اقتصادی (مثلاً حداقل سازی هزینه‌ها یا حداکثرسازی سود) در نظر گرفته می‌شوند. اکثر مقالات، زمان ایستا و تنظیمات مسئله قطعی را در نظر می‌گیرند. در حالی که انعطاف‌پذیری ماشین به طور جامع در نظر گرفته می‌شود، جنبه‌های خاص انعطاف‌پذیری نیروی کار کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. اکثر مقالات ترکیبی از انواع انعطاف‌پذیری پایه (ایستا) را در نظر می‌گیرند، در حالی که انعطاف‌پذیری سیستم (پویا) کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. تصمیمات چیدمان در اکثر مقالات، تا حدودی در ترکیب با تصمیمات ظرفیت مافوق یا پیکربندی مادون گرفته می‌شود. تصمیمات مربوط به برنامه‌ریزی و کنترل تولید اغلب در رویکردهای طراحی برای پیش‌بینی عملکرد عملیاتی سیستم‌ها گنجانده می‌شوند.

این حوزه، چشم‌اندازهای تحقیقاتی درخشانی را برای طراحی سیستم‌های تولیدی آینده ارائه می‌دهد. اولاً، ادبیات موجود تقریباً منحصراً به جنبه‌های عملکردگرا یا اقتصادی طراحی سیستم‌های تولیدی می‌پردازد. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده به طور فزاینده‌ای شاخص‌های اکولوژیکی و اجتماعی سیستم‌های تولیدی را در ملاحظات طراحی بگنجانند. ثانیاً، حوزه توسعه محصول، یک همکار مهم برای طراحی سیستم‌های تولیدی است و پیش‌نیازهای حیاتی برای بهره‌برداری از انعطاف‌پذیری در سیستم تولیدی را فراهم می‌کند. در نتیجه، توسعه محصول و طراحی سیستم تولیدی باید به طور فزاینده‌ای به طور مشترک مورد بررسی قرار گیرند. ثالثاً، تأثیر سیستم‌های جابجایی مواد مرتبط با تأسیسات

تولیدی عمدتاً با استفاده از فواصل سفر (وزنی) پیش‌بینی می‌شود. توجه صریح به آن در تصمیمات طراحی نادیده گرفته می‌شود.

دیدگاه‌های پژوهشی شرح داده شده ممکن است تغییرات اجتماعی مرتبطی را ایجاد کنند. تولید چرخشی کالاها در کارخانه‌های چرخشی به طور ویژه مرتبط تلقی می‌شود و می‌تواند با ادغام مراحل معکوس زنجیره ارزش در کارخانه‌های سنتی رو به جلو، یک صنعت با گرایش زیست‌محیطی را تسهیل کند. ماهیت درهم‌تنیده جریان مواد و حجم محصولات برگشتی که پیش‌بینی آنها دشوارتر است و شرایط آنها، فرصت‌های فراوانی را برای تحقیقات عملیاتی فراهم می‌کند. به طور مشابه، تولید عمودی که سطوح مختلف یک کارخانه را در بر می‌گیرد، به ایجاد کارخانه‌هایی نزدیک به محل سکونت کارکنان و حفظ آنها در اشتغال کمک می‌کند. در این حوزه، حوزه تحقیقات عملیاتی می‌تواند با توسعه روش‌های پیشرفته و ارائه پشتیبانی تصمیم‌گیری به متخصصان صنعتی، به طور قابل توجهی کمک کند.

منابع و مآخذ

- Aghajani, A, Didehbani, SA, Zadahmad, M, Seyedrezaei, MH, & Mohsenian, O. (2014). A multi-objective mathematical model for cellular manufacturing systems design with probabilistic demand and machine reliability analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 755–770.
- Ah kioon, S, Bulgak, AA, & Bektas, T. (2009a). Cellular manufacturing systems design with routing flexibility, machine procurement, production planning and dynamic system reconfiguration. *International Journal of Production Research*, 47, 1573–1600.
- Ah kioon, S, Bulgak, AA, & Bektas, T. (2009b). Integrated cellular manufacturing systems design with production planning and dynamic system reconfiguration. *European Journal of Operational Research*, 192, 414–428.
- Ahlström, ° P, & Westbrook, R. (1999). Implications of mass customization for operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, 19, 262–275.
- Alduaij, A, & Hassan, NM. (2020). Adopting a circular open-field layout in designing flexible manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33, 572–589.
- Alhourani, F. (2016). Cellular manufacturing system design considering machines reliability and parts alternative process routings. *International Journal of Production Research*, 54, 846–863.
- Aljuneidi, T, & Bulgak, AA. (2016). A mathematical model for designing reconfigurable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, 1585–1596.
- Aljuneidi, T, & Bulgak, AA. (2017). Designing a cellular manufacturing system featuring remanufacturing, recycling, and disposal options: A mathematical modeling approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 25–35.
- Arkat, J, Saidi, M, & Abbasi, B. (2007). Applying simulated annealing to cellular manufacturing system design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 531–536.
- Arzi, Y, Bukchin, J, & Masin, M. (2001). An efficiency frontier approach for the design of cellular manufacturing systems in a lumpy demand environment. *European Journal of Operational Research*, 134, 346–364.
- Asef-Vaziri, A, & Laporte, G. (2005). Loop based facility planning and material handling. *European Journal of Operational Research*, 164, 1–11.
- Ashraf, M, & Hasan, F. (2018). Configuration selection for a reconfigurable manufacturing flow line involving part production with operation constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98, 2137–2156.

- Battaïa, O, Dolgui, A, & Guschinsky, N. (2017). Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production. *International Journal of Production Research*, 55, 1368–1385.
- Battaïa, O, Dolgui, A, Heragu, SS., Meerkov, SM, & Tiwari, MK. (2018). Design for manufacturing and assembly/disassembly: Joint design of products and production systems. *International Journal of Production Research*, 56, 7181–7189.
- Bauernhansl, T. (2017). Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In B Vogel-Heuser, T Bauernhansl, & M tenHompe (Eds.), *Handbuch Industrie 4.0*, vol. 2 (pp. 1–33). Berlin: Springer.
- Baykasoglu, A. (2003). Capability-based distributed layout approach for virtual manufacturing cells. *International Journal of Production Research*, 41, 2597–2618.
- Bayram, H, & Sahin, R. (2016). A comprehensive mathematical model for dynamic cellular manufacturing system design and Linear Programming embedded hybrid solution techniques. *Computers & Industrial Engineering*, 91, 10–29.
- Bensmaine, A, Dahane, M, & Benyoucef, L. (2013). A non-dominated sorting genetic algorithm based approach for optimal machines selection in reconfigurable manufacturing environment. *Computers & Industrial Engineering*, 66, 519–524.
- Campos Sabioni, R, Daaboul, J, & Le Duigou, J (2022). Concurrent optimisation of modular product and Reconfigurable Manufacturing System configuration: A customer-oriented offer for mass customisation. *International Journal of Production Research*, 60, 2275–2291.
- Carrillo, JE, & Franza, RM. (2006). Investing in product development and production capabilities: The crucial linkage between time-to-market and ramp-up time. *European Journal of Operational Research*, 171, 536–556.
- Chae, J, & Peters, BA. (2006a). A simulated annealing algorithm based on a closed loop layout for facility layout design in flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 44, 2561–2572.
- Chae, J, & Peters, BA. (2006b). Layout design of multi-bay facilities with limited bay flexibility. *Journal of Manufacturing Systems*, 25, 1–11.
- Das, K, Lashkari, RS, & Sengupta, S. (2006). Reliability considerations in the design of cellular manufacturing systems. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 23, 880–904.
- Datta, D, Amaral, AR, & Figueira, JR. (2011). Single row facility layout problem using a permutation-based genetic algorithm. *European Journal of Operational Research*, 213, 388–394.
- Davis, SM. (1989). From “future perfect”: Mass customizing. *Planning Review*, 17, 16–21.
- Deep, K. (2020). Machine cell formation for dynamic part population considering part operation trade-off and worker assignment using simulated annealing-based genetic algorithm. *European Journal of Industrial Engineering*, 14, 189–207.
- Deep, K, & Singh, PK. (2015). Design of robust cellular manufacturing system for dynamic part population considering multiple processing routes using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 155–163.
- Defersha, FM, & Chen, M. (2006a). A comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 103, 767–783.
- ElMaraghy, HA. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 17, 261–276.
- Erenay, B, Süer, GA, Huang, J, & Maddisetty, S. (2015). Comparison of layered cellular manufacturing system design approaches. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 346–358.
- Erengüç, S, Simpson, NC, & Vakharia, AJ. (1999). Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review. *European Journal of Operational Research*, 115, 219–236.

- Essafi, M, Delorme, X, & Dolgui, A. (2012). A reactive GRASP and Path Relinking for balancing reconfigurable transfer lines. *International Journal of Production Research*, 50, 5213–5238.
- Fan, J, & Feng, D. (2013). Design of cellular manufacturing system with quasi-dynamic dual resource using multi-objective GA. *International Journal of Production Research*, 51, 4134–4154.
- Ficko, M, Brezovnik, S, Klancnik, S, Balic, J, Brezocnik, M, & Pahole, I. (2010). Intelligent design of an unconstrained layout for a flexible manufacturing system. *Neurocomputing*, 73, 639–647.
- Fischer, A, Fischer, F, & Hungerländer, P. (2019). New exact approaches to row layout problems. *Mathematical Programming Computation*, 11, 703–754.
- Fleischmann, B, Meyr, H, & Wagner, M. (2015). Advanced planning. In H Stadtler, C Kilger, & H Meyr (Eds.), *Supply chain management and advanced planning. concepts, models, software, and case studies* (pp. 71–95). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Flynn, JM, Shokrani, A, Newman, ST, & Dhokia, V. (2016). Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 101, 79–101.
- Ford, H. (1923/2015). *My life and work*. New York, NY: Open Road Media.
- Forghani, K, Mohammadi, M, & Ghezavati, V. (2015). Integrated cell formation and layout problem considering multi-row machine arrangement and continuous cell layout with aisle distance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78, 687–705.
- Fragapane, G, Koster, R de, Sgarbossa, F, & Strandhagen, JO (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 294, 405–426.
- Gaimon, C, & Singhal, V. (1992). Flexibility and the choice of manufacturing facilities under short product life cycles. *European Journal of Operational Research*, 60, 211–223.
- Gönsch, J. (2020). How much to tell your customer? – A survey of three perspectives on selling strategies with incompletely specified products. *European Journal of Operational Research*, 280, 793–817.
- Govindan, K, Soleimani, H, & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240, 603–626.
- Goyal, KK, & Jain, PK. (2015). Design of reconfigurable flow lines using MOPSO and maximum deviation theory. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, 1587–1600.
- Goyal, KK, Jain, PK, & Jain, M. (2012). Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing system using NSGA II and TOPSIS. *International Journal of Production Research*, 50, 4175–4191.
- Greene, TJ, & Sadowski, RP. (1984). A review of cellular manufacturing assumptions, advantages and design techniques. *Journal of Operations Management*, 4, 85–97.
- Hottenrott, A, Schiffer, M, & Grunow, M. (2023). Flexible assembly layouts in smart manufacturing: An impact assessment for the automotive industry. *IIE Transactions*, 55, 1144–1159.
- Huang, S, Wang, G, & Yan, Y. (2019). Delayed reconfigurable manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 57, 2372–2391.
- Huang, S, & Yan, Y. (2020). Design of delayed reconfigurable manufacturing system based on part family grouping and machine selection. *International Journal of Production Research*, 58, 4471–4488.
- Hungerländer, P, & Anjos, MF. (2015). A semidefinite optimization-based approach for global optimization of multi-row facility layout. *European Journal of Operational Research*, 245, 46–61.
- Ivanov, D, Das, A, & Choi, T-M. (2018). New flexibility drivers for manufacturing, supply chain and service operations. *International Journal of Production Research*, 56, 3359–3368.

- Javadi, B, Jolai, F, Slomp, J, Rabbani, M, & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). An integrated approach for the cell formation and layout design in cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 51, 6017–6044.
- Javadian, N, Aghajani, A, Rezaeian, J, & Ghaneian Sebdani, MJ (2011). A multi-objective integrated cellular manufacturing systems design with dynamic system reconfiguration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, 307–317.
- Kia, R, Baboli, A, Javadian, N, Tavakkoli-Moghaddam, R, Kazemi, M, & Khorrami, J. (2012). Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing. *Computers & Operations Research*, 39, 2642–2658.
- Kia, R, Khaksar-Haghani, F, Javadian, N, & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). Solving a multi-floor layout design model of a dynamic cellular manufacturing system by an efficient genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 33, 218–232.
- Kickert, WJM. (1984). The Magic Word Flexibility. *International Studies of Management & Organization*, 14, 6–31.
- Kim, K, & Chhajer, D. (2000). Commonality in product design: Cost saving, valuation change and cannibalization. *European Journal of Operational Research*, 125, 602–621.
- Klein, R, Koch, S, Steinhardt, C, & Strauss, AK. (2020). A review of revenue management: Recent generalizations and advances in industry applications. *European Journal of Operational Research*, 284, 397–412.
- Koren, Y, Heisel, U, Jovane, F, Moriwaki, T, Pritschow, G, Ulsoy, G, & van Brussel, H. (1999). Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Annals*, 48, 527–540.
- Koren, Y, Wang, W, & Gu, X. (2017). Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 55, 1227–1242.
- Kuhn, H. (1998). *Fließproduktionssysteme*. Heidelberg: Leistungsbewertung, Konfigurations- und Instandhaltungsplanung. Physica.
- Kumar, R, & Singh, SP. (2017). A similarity score-based two-phase heuristic approach to solve the dynamic cellular facility layout for manufacturing systems. *Engineering Optimization*, 49, 1848–1867.
- Mallikarjuna, K, Veeranna, V, & Reddy, KH. (2016). A new meta-heuristics for optimum design of loop layout in flexible manufacturing system with integrated scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, 1841–1860.
- Mansour, H, Afefy, IH, & Taha, SM. (2022). Heuristic-based approach to solve layout design and workers' assignment problem in the cellular manufacturing system. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 17, 49–65.
- Mansour, H, Afefy, IH, & Taha, SM. (2023). Simultaneous layout design optimization with the scalable reconfigurable manufacturing system. *Production Engineering*, 17, 565–573.
- Matta, A, Tolio, T, & Tontini, F. (2004). Tool management in flexible manufacturing systems with network part program. *International Journal of Production Research*, 42, 3707–3730.
- Matzke, A, Volling, T, & Spengler, TS. (2016). Upgrade auctions in build-to-order manufacturing with loss-averse customers. *European Journal of Operational Research*, 250, 470–479.
- Müller, C, Grunewald, M, & Spengler, TS. (2018). Redundant configuration of robotic assembly lines with stochastic failures. *International Journal of Production Research*, 56, 3662–3682.
- Neghabat, F. (1974). An Efficient Equipment-Layout Algorithm. *Operations Research*, 22, 622–628.
- Offodile, OF, Mehrez, A, & Grznar, J. (1994). Cellular manufacturing: A taxonomic review framework. *Journal of Manufacturing Systems*, 13, 196–220.
- Otto, A, & Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 212, 277–286.
- Ozcelik, F. (2012). A hybrid

- genetic algorithm for the single row layout problem. *International Journal of Production Research*, 50, 5872–5886.
- Özceylan, E, Kalayci, CB, Güngör, A, & Gupta, SM. (2019). Disassembly line balancing problem: A review of the state of the art and future directions. *International Journal of Production Research*, 57, 4805–4827.
- Papaioannou, G, & Wilson, JM. (2010). The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research. *European Journal of Operational Research*, 206, 509–521.
- Paydar, MM, Mahdavi, I, Sharafuddin, I, & Solimanpur, M. (2010). Applying simulated annealing for designing cellular manufacturing systems using MDmTSP. *Computers & Industrial Engineering*, 59, 929–936.
- Pérez Pérez, M, Serrano Bedia, AM, & López Fernández, MC (2016). A review of manufacturing flexibility: Systematising the concept. *International Journal of Production Research*, 54, 3133–3148.
- Pillai, VM, & Subbarao, K. (2008). A robust cellular manufacturing system design for dynamic part population using a genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 46, 5191–5210.
- Pine, BJ. (1993). Mass customizing products and services. *Planning Review*, 21, 6–55.
- Potts, CN, & Whitehead, JD. (2001). Workload balancing and loop layout in the design of a flexible manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 129, 326–336.
- Saad, SM, Baykasoglu, A, & Gindy, NNZ. (2002). An integrated framework for reconfiguration of cellular manufacturing systems using virtual cells. *Production Planning & Control*, 13, 381–393.
- Saeed Jabal Ameli, M, & Arkat, J. (2008). Cell formation with alternative process routings and machine reliability consideration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35, 761–768.
- Safaei, N, Saidi-Mehrabad, M, & Babakhani, M. (2007). Designing cellular manufacturing systems under dynamic and uncertain conditions. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18, 383–399.
- Safaei, N, Saidi-Mehrabad, M, & MS, Jabal-Ameli (2008). A hybrid simulated annealing for solving an extended model of dynamic cellular manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 185, 563–592.
- Satoglu, SI, & Suresh, NC. (2009). A goal-programming approach for design of hybrid cellular manufacturing systems in dual resource constrained environments. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 560–575.
- Saxena, LK, & Jain, PK. (2011). Dynamic cellular manufacturing systems design—A comprehensive model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 11–34.
- Saxena, LK, & Jain, PK. (2012). A model and optimisation approach for reconfigurable manufacturing system configuration
- Solimanpur, M, Vrat, P, & Shankar, R. (2004). A multi-objective genetic algorithm approach to the design of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 42, 1419–1441.
- Solimanpur, M, Vrat, P, & Shankar, R. (2005). An ant algorithm for the single row layout problem in flexible manufacturing systems. *Computers & Operations Research*, 32, 583–598.
- Songore, GV, & Songore, V. (2000). Cellular manufacturing systems design using Tabu search. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 214, 169–172.
- Tempelmeier, H, & Kuhn, H. (1993). Flexible manufacturing systems. Decision support for design and operation. New York: Wiley.
- Terwiesch, C, & Bohn, RE. (2001). Learning and process improvement during production ramp-up. *International Journal of Production Economics*, 70, 1–19.

- Thies, C, Kieckhäfer, K, Spengler, TS, & Sodhi, MS. (2019). Operations research for sustainability assessment of products: A review. *European Journal of Operational Research*, 274, 1–21.
- Tolio, T, & Urgo, M. (2013). Design of flexible transfer lines: A case-based reconfiguration cost assessment. *Journal of Manufacturing Systems*, 32, 325–334.
- Tolio, T, & Valente, A. (2009). A stochastic programming approach to design the production system flexibility considering the evolution of the part families. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 17, 42–67.
- Tubaileh, A, & Siam, J. (2017). Single and multi-row layout design for flexible manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30, 1316–1330.
- Tubaileh, AS. (2014). Layout of flexible manufacturing systems based on kinematic constraints of the autonomous material handling system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74, 1521–1537.
- Upton, DM. (1994). The management of manufacturing flexibility. *California Management Review*, 36, 72–89.
- Vairaktarakis, G. L., Cai, X., & Lee, C.-Y. (2002). Workforce planning in synchronous production systems. *European Journal of Operational Research*, 136, 551–572.
- van den Broeke, MM, Boute, RN, & van Miegheem, JA. (2018). Platform flexibility strategies: R&D investment versus production customization tradeoff. *European Journal of Operational Research*, 270, 475–486.
- Venkataramanaiah, S, & Krishnaiah, K. (2002). Hybrid heuristic for design of cellular manufacturing systems. *Production Planning & Control*, 13, 274–283.
- Volling, T, Matzke, A, Grunewald, M, & Spengler, TS. (2013). Planning of capacities and orders in build-to-order automobile production: A review. *European Journal of Operational Research*, 224, 240–260.
- Wang, J. (2003). Formation of machine cells and part families in cellular manufacturing systems using a linear assignment algorithm. *Automatica*, 39, 1607–1615.
- Wang, TY, Wu, KB, & Liu, YW. (2001). A simulated annealing algorithm for facility layout problems under variable demand in Cellular Manufacturing Systems. *Computers in Industry*, 46, 181–188.
- Wang, W, & Koren, Y. (2012). Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 31, 83–91.
- Wu, C-H. (2012). Product-design and pricing strategies with remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 222, 204–215.
- Wu, X, Chu, C-H, Wang, Y, & Yan, W. (2006). Concurrent design of cellular manufacturing systems: A genetic algorithm approach. *International Journal of Production Research*, 44, 1217–1241.
- Yang, J, Liu, F, Dong, Y, Cao, Y, & Cao, Y. (2022). Multiple-objective optimization of a reconfigurable assembly system via equipment selection and sequence planning. *Computers & Industrial Engineering*, 172, Article 108519.
- Yang, T, Peters, BA, & Tu, M. (2005). Layout design for flexible manufacturing systems considering single-loop directional flow patterns. *European Journal of Operational Research*, 164, 440–455.
- Yelles-Chaouche, AR, Gurevsky, E, Brahimi, N, & Dolgui, A. (2020). Reconfigurable manufacturing systems from an optimisation perspective: A focused review of literature. *International Journal of Production Research*, 1–19.
- Youssef, AMA, & ElMaraghy, HA. (2006). Modelling and optimization of multiple-aspect RMS configurations. *International Journal of Production Research*, 44, 4929–4958.
- Zeidi, JR, Javadian, N, Tavakkoli-Moghaddam, R, & Jolai, F. (2013). A hybrid multi-objective approach based on the genetic algorithm and neural network to design an

incremental cellular manufacturing system. *Computers & Industrial Engineering*, 66, 1004–1014.

Zhu, Q, Huang, S, Wang, G, Moghaddam, SK, Lu, Y, & Yan, Y. (2022). Dynamic reconfiguration optimization of intelligent manufacturing system with human-robot collaboration based on digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 330–338.

Zhu, Z, Dhokia, VG, Nassehi, A, & Newman, ST. (2013). A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26, 596–615