

ارزیابی تولید پایدار در همکاری انسان و ربات با استفاده از مدل‌سازی شبیه‌سازی

امیرحسین حسین پور

دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران

چکیده

این مقاله به بررسی استفاده از ابزار مدل‌سازی شبیه‌سازی برای ارزیابی اهمیت تولید پایدار در همکاری انسان و ربات می‌پردازد. این مطالعه پارامترهای کلیدی تولید پایدار (مصرف، نرخ ضایعات، هزینه، زمان و مقادیر) را از دیدگاه‌های اجتماعی، محیطی و اقتصادی ارزیابی می‌کند. مدل شبیه‌سازی برای استخراج پارامترهای زمانی و مقداری برای محیط کاری مشترک استفاده شده است که می‌توان آنها را مستقیماً در سناریوهای دنیای واقعی به کار برد. یافته‌ها نشان‌دهنده اثربخشی روش‌های مدل‌سازی شبیه‌سازی در ارزیابی محیط‌های کاری مشترک در زمینه تولید پایدار است. نتایج به سوال اولیه مبنی بر چگونگی ارزیابی تاثیر ربات‌های همکار بر انسان‌ها و پایداری سیستم تولید توسط تحقیقات چند زمینه‌ای پاسخ می‌دهند. این مطالعه نشان می‌دهد که همکاری پیشرفته انسان و ربات می‌تواند کمبود نیروی کار در کشورهای توسعه‌یافته را کاهش دهد و از طریق یک سیستم تولید بسیار کارآمد و پایدار، رقابت‌پذیری جهانی شرکت‌ها را تضمین کند.

واژگان کلیدی: تولید پایدار - همکاری انسان و ربات - محل کار - شبیه‌سازی

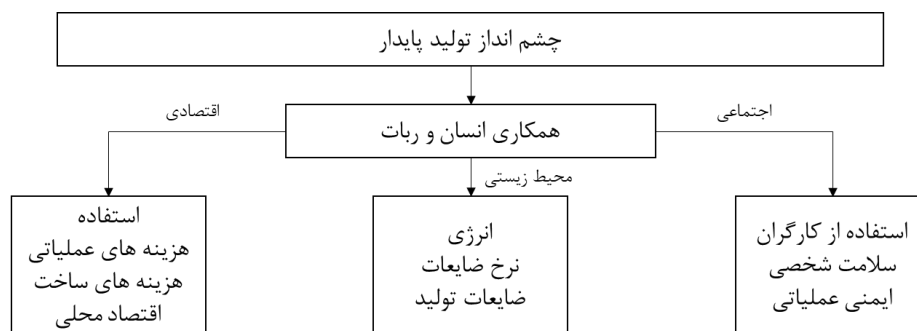
مقدمه و مرور ادبیات

در عصر صنعت ۴.۰ و گذار به فناوری‌های نوین، این فناوری‌ها فرصت‌های جدیدی را برای دستیابی به سیستم‌های تولیدی کارآمدتر فراهم می‌کنند (Rosin et al., 2021). با آگاهی از اهمیت تولید پایدار، شرکت‌ها به دنبال راه‌حل‌های جدیدی هستند تا کارایی سیستم‌های تولیدی را افزایش دهند، جایی که در دنیای توسعه‌یافته اغلب با محدودیت‌های نیروی کار، محیطی و اقتصادی مواجه می‌شوند (Ojstersek et al., 2022). فناوری‌ای که می‌تواند این امکان را فراهم کند، استفاده از ماشین‌های همکار (عمدتاً ربات‌ها) در سیستم‌های تولید است (Gualtieri et al., 2020)، هرچند استفاده از آن‌ها لزوماً تمامی پارامترهای تولید پایدار را برآورده نمی‌کند. ربات‌های همکار امکان همکاری ایمن و کارآمد با انسان‌ها را فراهم می‌کنند، اما تأثیر آن‌ها بر رفاه کارگر و به طور کلی بر کارایی سیستم تولید را نمی‌دانیم (Pascual et al., 2021). مطالعات قبلی در حوزه صنعتی نشان می‌دهند که ابزارهای موجود برای برنامه‌ریزی تأثیر محیط‌های کاری مشترک نمی‌توانند به طور کامل مناسب بودن آن‌ها را به نحوی که برای ربات‌های صنعتی می‌دانیم، در نظر بگیرند (Gihleb et al., 2022). نقص محیط‌های کاری مشترک اغلب در عملکرد نسبتاً پایین‌تر برنامه‌ها در مقایسه با برنامه‌های رباتیک سنتی بدون تعامل انسانی است (Himmelsbach et al., 2021). مسئله بهینه‌سازی چندرشته‌ای (Mirzapour Al-e-Hashem et al., 2011) ایجاب می‌کند که به طور همزمان ایمنی کارگر و کارایی محیط کار را افزایش دهیم، و از این رو به دنبال توجیه اقتصادی باشیم (Kanazawa et al., 2019). استفاده از روش‌های مدل‌سازی شبیه‌سازی (Chen & Hao, 2022) تضمین می‌کند که کنترل تولید در یک محیط تولید پویا، قابل اعتماد و پایدار باشد، جایی که شرکت بتواند رقابت جهانی خود را حفظ کند. با استفاده از روش‌های مدل‌سازی شبیه‌سازی کاربردی، نویسندگان قادر بودند نتایج را به محیط واقعی انتقال دهند، جایی که می‌توانند تأثیر محیط‌های کاری مشترک بر کارایی سیستم تولید را پیش‌بینی کنند (Chen & Hao, 2022). در عین حال، آن‌ها اثبات کردند که طراحی بهینه محیط‌های کاری مشترک برای بهبود عملکرد دستکاری‌کننده‌های رباتیک و کارگران به‌ویژه مهم است (Hu et al., 2020).

با اجرای صحیح محیط‌های کاری مشترک، می‌توانیم خطرات منجر به مشکلات سلامتی کارگران را کاهش دهیم، زیرا ربات‌های همکار وظایفی را که برای کارگران سخت و تکراری است انجام می‌دهند (Realyvásquez-Vargas et al., 2019). برنامه‌ریزی و مکان‌گذاری مناسب محیط کار می‌تواند کارایی کلی فرآیند تولید را افزایش دهد (Meng, 2021). اثربخشی ربات‌های همکار در زمینه‌های مختلف کاربردی نشان داده شده است (El Zaatari et al., 2019; Fager et al., 2020)، اما محققان همچنان در مورد اثربخشی و مزایای آن‌ها و محدودیت‌های آن‌ها از دیدگاه تولید پایدار سوال دارند. تولید پایدار یک جنبه مهم و در حال افزایش سیستم‌های تولیدی کارآمد کل‌نگر است (Garetti & Taisch, 2012). با معرفی محیط‌های کاری مشترک، صنعت به دنبال مجموعه‌ای باز، فراگیر و بی‌طرف از شاخص‌ها برای اندازه‌گیری پایداری محصولات و فرآیندهای تولیدی است (Joung et al., 2013). علیرغم پذیرش اقتصادی توجیه پذیر و به‌خوبی تحقیق‌شده محیط‌های کاری مشترک (Machado et al., 2020)، جنبه‌های اجتماعی و محیطی توجیه چنین محیط‌هایی همچنان بررسی نشده باقی مانده‌اند (Ojstersek & Buchmeister, 2020). بر اساس تحقیقات قبلی، ما دریافتیم که محققان بر ارزیابی و بهینه‌سازی پارامترهای فردی تولید پایدار (Wang et al., 2018)، مرتبط با موارد صنعتی خاص (Liu et al., 2019) تمرکز می‌کنند و یک رویکرد یکپارچه برای ارزیابی محیط‌های کاری مشترک آشکار نیست. در این تحقیق، ما قصد داریم رویکرد مدل‌سازی شبیه‌سازی را برای به دست آوردن داده‌های یک محیط کاری مشترک ارائه دهیم، که می‌تواند برای تایید پارامترهای تولید پایدار استفاده شود. با رویکرد پیشنهادی، هدف ما کاهش خطر محیط‌های کاری مشترک غیرقابل توجیه پایدار از پیش است، که برای شرکت‌ها امکان رقابت جهانی را فراهم می‌آورد.

شرح مسئله

محیط‌های کاری مشترک، جایی که انسان به‌طور مستقیم با یک ربات تعامل دارد، در صنعت به‌طور فزاینده‌ای رایج شده‌اند. با توسعه سریع ربات‌های همکار در محیط صنعتی، شرکت‌ها اغلب به دلیل مزایای مرتبط با توجیه مالی، گاهی عدم وجود قوانین درباره ویژگی‌های ایمنی مرتبط (حتی در سطح ملی) و سهولت اجرای مستقیم در محیط واقعی، ربات‌های همکار را انتخاب کرده‌اند. با روند افزایش آگاهی از اهمیت تولید پایدار، محیط‌های کاری مشترک به عنوان یک فناوری کلیدی نمایان شده‌اند که می‌تواند بر اساس هر سه جنبه اصلی تولید پایدار قرار گیرد. در شکل ۱، نمودار بلوکی پیشنهادی دیدگاه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیطی تولید پایدار را نشان می‌دهد، به طوری که محیط‌های کاری مشترک سیستم تولیدی با کارایی بالا، توجیه محیطی و تعادل اجتماعی فراهم می‌کنند. با بحث در مورد تولید پایدار، تعداد رو به رشدی از شرکت‌ها آن را به عنوان هدف کلیدی در استراتژی خود برای افزایش رشد و رقابت جهانی بیان می‌کنند. تولید پایدار به معنای تولید محصولات با استفاده از فرآیندی است که تأثیرات منفی بر محیط زیست را به حداقل می‌رساند، انرژی و منابع طبیعی را حفظ می‌کند و برای کارکنان، جوامع و مصرف‌کنندگان ایمن است. هدف کلی تولید پایدار در نظر گرفتن کل چرخه محصول و بهینه‌سازی چرخه عمر سیستم‌های تولید، محصولات و خدمات است.

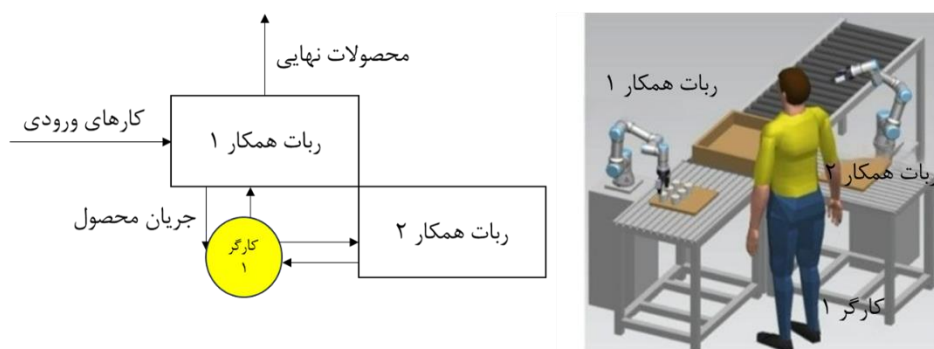


شکل ۱. نمودار شرح مساله

تولید پایدار نه تنها محصولات پایدارتر تولید می‌کند، بلکه فرآیندهای تولید را نیز پایدارتر می‌سازد، که منجر به افزایش سود کلی شرکت برای جامعه و محیط زیست می‌شود. هنگام معرفی یک محیط کاری مشترک به سیستم تولید، سوال این است که آیا ربات همکار می‌تواند جهت‌گیری پایداری شرکت را افزایش دهد یا خیر. همچنین برای شرکت‌های تولیدی، هزینه اولیه سرمایه‌گذاری مطرح است که عموماً کمتر از خرید یک ربات صنعتی است، اما همچنان بیشتر از هزینه نیروی کار انسانی در کشورهای در حال توسعه یا کمتر توسعه‌یافته است. در کشورهای توسعه‌یافته با کمبود نیروی کار، ربات‌های همکار می‌توانند جایگزین کمبود نیروی انسانی برای کارهای یکنواخت، خطرناک یا سمی شوند. با این حال، هزینه‌های سرمایه‌گذاری هر ساله با توسعه فناوری‌های جدید کاهش می‌یابد و ربات‌های همکار بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیق ارائه شده به ارزیابی پایداری محیط کاری مشترک می‌پردازد که در آن یک کارگر با دو ربات همکار کار می‌کند. هدف شرکت این است که توجیه پایداری معرفی چنین محیط کاری را ارزیابی کند، جایی که می‌خواهیم توجیه اقتصادی را با پارامترهای هزینه‌های عملیاتی و بیکار، توجیه محیطی را با پارامتر ضایعات فرآیند، و شمول اجتماعی کارگر را با استفاده بالا و یکنواخت از او تأیید کنیم.

مدل سازی شبیه سازی

تحقیق ارائه شده از روش مدل سازی شبیه سازی برای ارزیابی مناسب بودن یک محیط کاری مشترک از دیدگاه تولید پایدار استفاده می کند. در این تحقیق از نرم افزار Tecnomatix شرکت زیمنس استفاده شده است که در آن مدل یک محیط کاری مشترک شبیه سازی شده است، همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است. مطالعه موردی ارزیابی شده داده های واقعی را در نظر می گیرد که در آن دینامیک محیط کاری مشترک فرض شده است. مدل شبیه سازی با پارامترهای زیر اجرا می شود: زمان شیفت ۸ ساعت است، که در صورت نیاز کارگر ۱ توسط کارگر ۲ جایگزین می شود (استراحت های قانونی). مدل شبیه سازی در سه شیفت در روز اجرا می شود، به طوری که زمان شبیه سازی فرض شده ۱۴۴۰ دقیقه است. طبق برنامه سه شیفته، مدل شبیه سازی از یک دوره گرم کردن چهار ساعته استفاده می کند. هدف نهایی بهینه محیط کاری مشترک برای پارامتر تعداد محصول نهایی در روز، ۵۷۶۰ قطعه نهایی است، با فرض اینکه هر ۱۵ ثانیه یک قطعه جدید وارد شود. زمان انتقال در زمان عملیاتی هر عملیات مونتاژ لحاظ شده است. محصولات نیمه تمام همیشه در دسترس هستند.



شکل ۲. دیاگرام پیشنهادی و مدل شبیه سازی مطالعه موردی ارزیابی شده

جدول ۱ شامل داده های ورودی است که مدل شبیه سازی داده محور را توصیف می کند. ایستگاه کاری مشترک، شامل اولین ربات همکار (CR1) و دومین ربات همکار (CR2)، زمان پردازش ثابت، هزینه های عملیاتی و هزینه های بیکاری مشخص شده ای دارند.

جدول ۱. پارامترهای ورودی مدل شبیه سازی

بسته‌بندی	وارد کردن-۲	پیچ کردن	وارد کردن-۱	قرار دادن	عملیات
CR1	W	CR2	W	CR1	اپراتور
7.2	T (7.5, 8.8, 10.1)	15	T (6.8, 8, 9.2)	5.9	زمان پردازش [ثانیه]
37	23	33	23	37	هزینه عملیاتی [واحد/ساعت]
13	23	11	23	13	هزینه بیکاری [واحد/ساعت]
T (1, 1.5, 2)	U (4, 7)	T (1, 1.5, 2)	U (4, 7)	T (1, 1.5, 2)	نرخ ضایعات [%]

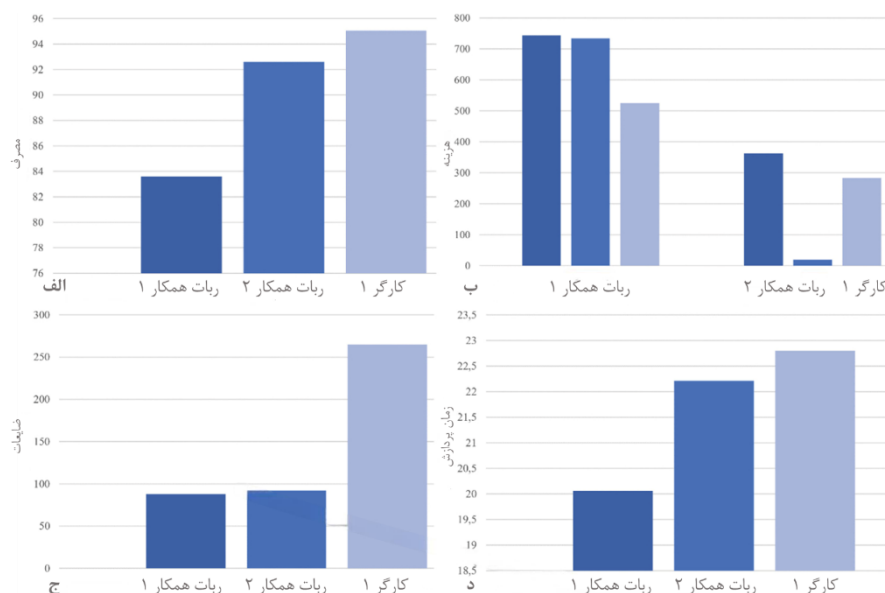
حرف T برای توزیع مثلثی و حرف U برای توزیع یکنواخت استفاده می‌شود. ربات همکار CR1 عملیات قرار دادن و بسته‌بندی را انجام می‌دهد، در حالی که ربات همکار CR2 عملیات پیچ کردن را انجام می‌دهد. در صورت همکاری، یک کارگر (W) وجود دارد که دو عملیات برای وارد کردن قطعات را انجام می‌دهد. هزینه عملیاتی و هزینه بیکاری نیز برای کارگر تعیین شده است. زمان‌های پردازش برای ربات‌های همکار و کارگر در محیط نرم‌افزاری با رویکرد مدل‌سازی توالی تعیین شده است، جایی که ما می‌توانیم دقیقاً پارامترهای زمان و توالی را تعریف کنیم که می‌تواند مستقیماً به محیط واقعی منتقل شود. فرضیات مربوط به هزینه‌های عملیاتی و بیکاری، وقتی یک ماشین همکار معرفی می‌شود، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه با دوره استهلاک پنج ساله است. هزینه‌های مربوط به کارگر به نرخ ساعتی ناخالص کارگر اشاره دارد.

جدول ۲. نتایج ارزیابی مشارکتی محل کار

پارامتر	جنبه تولید پایدار	اپراتور		
		CR1	CR2	W
استفاده [%]	اجتماعی/اقتصادی	83.6	92.6	65.03
هزینه عملیاتی [واحد]	اقتصادی	742.64	733.01	524.62
هزینه بیکاری [واحد]	اقتصادی	363.1	19.66	282.9
ضایعات [قطعه]	محیطی	88	92	265
زمان پردازش [ساعت]	اجتماعی/اقتصادی	20.06	22.21	22.8
مجموع محصولات تولید شده [عدد]	اقتصادی	5265		

نتایج در شکل ۳-الف نشان می‌دهند که میانگین استفاده از ربات‌های همکار و کارگر ۹۰.۴٪ است، با بالاترین میزان استفاده از کارگر با مجموع استفاده ۹۵.۰۳٪، که می‌تواند در صورت ورود قطعات اضافی یک گلوگاه ایجاد کند. با توجه به اینکه مدت زمان شبیه‌سازی ۱۴۴۰ دقیقه بود، مفید خواهد بود که این زمان را افزایش دهیم، به خصوص برای ارزیابی استفاده از کارگر در یک دوره طولانی‌تر. بالاترین هزینه پردازش، همانطور که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، مربوط به ربات همکار CR1 است، و پس از آن ربات همکار CR2 قرار دارد، و کمترین هزینه کاری مربوط به کارگر است. این نتایج ثابت می‌کنند که استفاده از نیروی کار در دنیای کمتر توسعه‌یافته، جایی که نرخ ساعتی کارگر در تولید پایین است، هنوز یک عامل مهم در پذیرش سیستم‌های خودکار و رباتیک است. البته، کمبود نیروی کار در کشورهای توسعه‌یافته و بازگشت صنعت (بازپس‌سازی) از کشورهای کمتر توسعه‌یافته به‌طور قابل توجهی نرخ ساعتی کارگر را افزایش می‌دهد، و در این مورد، ربات‌های همکار می‌توانند یکی از ستون‌های اصلی تولید سری و انعطاف‌پذیر باشند.

با بررسی هزینه کل اپراتورها، متوجه می‌شویم که ربات همکار CR1 با ۱۱۰۵.۷ واحد برای سه شیفت، گران‌ترین است، ربات همکار CR2 با ۱۰۰.۸٪ ارزان‌تر و کارگر حتی با ۳۷.۸٪ ارزان‌تر است که این موضوع ادعاهای بالا را بیشتر تأیید می‌کند. در مورد پارامتر نرخ ضایعات فرآیند، مشاهده می‌کنیم (شکل ۳-ج) که برای ربات‌های همکار به‌طور میانگین ۹۰ قطعه در سه شیفت است، در حالی که برای کارگر به دلیل خطاهای مونتاژ به ۲.۹۴ برابر افزایش می‌یابد و به ۲۶۵ قطعه می‌رسد. از دیدگاه طراحی فرآیند، پایه‌های درگیر تضمین‌کننده مقاومت و قابلیت اطمینان بالاتر کار انجام‌شده توسط ربات‌های همکار با کمترین ضایعات مواد، منابع و زمان هستند. پارامتر زمان پردازش در شکل ۳-د صحت عملکرد مدل شبیه‌سازی را اثبات می‌کند، زیرا داده‌ها دقیقاً با دستورالعمل‌های پارامتر استفاده اپراتورها مطابقت دارند. طبق هدف بهینه شرکت برای تولید ۵۷۶۰ قطعه در سه شیفت، نتایج نشان می‌دهد که محیط کاری مشترک به‌طور میانگین ۵۲۶۵ قطعه تولید می‌کند که ۸.۶٪ کمتر از مقدار مورد نیاز است.



شکل ۳. نتایج پارامترها: الف) مصرف، ب) هزینه، ج) ضایعات و د) زمان پردازش.

بحث و نتیجه‌گیری

سوال اصلی تحقیق، اهمیت مطالعه جنبه تولید پایدار در محیط‌های کاری مشترک را مد نظر قرار داده است. با استفاده از پارامترهای ارزیابی شده از توجیهات اجتماعی، محیطی و اقتصادی، نتایج ارائه‌شده به سوال تحقیق با داده‌هایی پاسخ می‌دهند که اهمیت یکپارچه‌سازی مناسب فناوری‌های مدرن در سیستم‌های تولیدی موجود یا پیشنهادی جدید را اثبات می‌کنند. در مورد جنبه اجتماعی، باید توجه داشت که پذیرش محیط‌های کاری مشترک به قیمت و در دسترس بودن نیروی کار بستگی دارد. با احتمال بالا، می‌توانیم ادعا کنیم که در کشورهای بسیار توسعه‌یافته، محیط‌های کاری مشترک نمایانگر یک فرصت برای افزایش سطح رقابت اقتصادی هستند. در این تحقیق، پارامترهای فعالیت کارگر و زمان پردازش او از جنبه اجتماعی مورد ارزیابی قرار گرفتند. این دو پارامتر تنها می‌توانند به سوال اشتغال مستمر کارگر پاسخ دهند، اما از نقطه‌نظر رفاه کارگر، محدودیت‌هایی وجود دارد که سوالاتی را در مورد وضعیت روانی-جسمانی او مطرح می‌کند.

هنگام ارزیابی توجیه اکولوژیکی محیط کاری مشترک، اهمیت پارامتر نرخ ضایعات فرآیند را ارائه کردیم، که می‌توان نتیجه گرفت که کارگر با تلفات بیشتری مواجه است، نه تنها به صورت ضایعات فرآیند، بلکه به صورت زمانی که برای تولید محصولات ضایعاتی صرف می‌شود و در نتیجه، کارایی نهایی پایین‌تر خواهد بود. علی‌رغم اهمیت دیدگاه‌های اجتماعی و محیطی تولید پایدار، توجیه اقتصادی همچنان نقش کلیدی در پذیرش فناوری‌های جدید ایفا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که دیدگاه اقتصادی به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه ربات‌های همکار بستگی دارد که می‌تواند کمتر از سلول‌های رباتیک کاملاً خودکار باشد. در همین حال، مسئله قیمت نیروی کار مطرح است که می‌تواند حتی در کشورهای توسعه‌یافته نیز ارزش کاملاً متفاوتی داشته باشد (به عنوان مثال، تفاوت‌های بین کشورهای اتحادیه اروپا). بنابراین، هنوز هم شاهد شرکت‌هایی هستیم که به دنبال بازارهایی هستند که نیروی کار ارزان‌تر باشد. نتایج امکان ارزیابی محیط‌های کاری مشترک را از دیدگاه تولید پایدار پیش از سرمایه‌گذاری در چنین محیطی فراهم می‌کند. با استفاده از رویکرد ارائه‌شده، شرکت‌ها می‌توانند توصیه‌پذیری معرفی محیط‌های کاری مشترک به سیستم تولیدی موجود یا برنامه‌ریزی‌شده جدید خود را تعیین کنند.

منابع

- Chen, W., & Hao, Y. (2022). A COMBINED SERVICE OPTIMIZATION AND PRODUCTION CONTROL SIMULATION SYSTEM. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 21(4).
- El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116, 162-180.
- Fager, P., Calzavara, M., & Sgarbossa, F. (2020). Modelling time efficiency of cobot-supported kit preparation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, 2227-2241.
- Garetti, M., & Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: trends and research challenges. *Production planning & control*, 23(2-3), 83-104.
- Gihleb, R., Giuntella, O., Stella, L., & Wang, T. (2022). Industrial robots, workers' safety, and health. *Labour economics*, 78, 102205.
- Gualtieri, L., Palomba, I., Merati, F. A., Rauch, E., & Vidoni, R. (2020). Design of human-centered collaborative assembly workstations for the improvement of operators' physical ergonomics and production efficiency: A case study. *Sustainability*, 12(9), 3606.
- Himmelsbach, U. B., Wendt, T. M., Hangst, N., Gawron, P., & Stiglmeier, L. (2021). Human-machine differentiation in speed and separation monitoring for improved efficiency in human-robot collaboration. *Sensors*, 21(21), 7144.
- Hu, M., Wang, H., & Pan, X. (2020). Multi-objective global optimum design of collaborative robots. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62(3), 1547-1561.
- Joung, C. B., Carrell, J., Sarkar, P., & Feng, S. C. (2013). Categorization of indicators for sustainable manufacturing. *Ecological indicators*, 24, 148-157.
- Kanazawa, A., Kinugawa, J., & Kosuge, K. (2019). Adaptive motion planning for a collaborative robot based on prediction uncertainty to enhance human safety and work efficiency. *IEEE Transactions on Robotics*, 35(4), 817-832.
- Liu, Q., Liu, Z., Xu, W., Tang, Q., Zhou, Z., & Pham, D. T. (2019). Human-robot collaboration in disassembly for sustainable manufacturing. *International Journal of Production Research*, 57(12), 4027-4044.
- Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462-1484.
- Meng, J. (2021). DEMAND PREDICTION AND ALLOCATION OPTIMIZATION OF MANUFACTURING RESOURCES. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 20(4).
- Mirzapour Al-e-Hashem, S., Baboli, A., Sadjadi, S., & Aryanezhad, M. (2011). A Multiobjective Stochastic Production-Distribution Planning Problem in an Uncertain Environment Considering Risk and Workers Productivity. *Mathematical Problems in Engineering*, 2011(1), 406398.
- Ojstersek, R., & Buchmeister, B. (2020). Simulation modeling approach for collaborative workplaces' assessment in sustainable manufacturing. *Sustainability*, 12(10), 4103.
- Ojstersek, R., Javernik, A., & Buchmeister, B. (2022). Importance of sustainable collaborative workplaces-simulation modelling approach. *Int. J. Simul. Model*, 21(4), 627-638.
- Pascual, A. I., Högberg, D., Lämkuhl, D., Luque, E. P., Syberfeldt, A., & Hanson, L. (2021). Optimization of productivity and worker well-being by using a multi-objective optimization framework. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 9(3-4), 143-153.
- Realyváquez-Vargas, A., Arredondo-Soto, K. C., García-Alcaraz, J. L., Márquez-Lobato, B. Y., & Cruz-García, J. (2019). Introduction and configuration of a collaborative robot in an assembly task as a means to decrease occupational risks and increase efficiency in a manufacturing company. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 315-328.
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2021). Impact of Industry 4.0 on decision-making in an operational context. *Advances in Production Engineering & Management*, 16(4).
- Wang, L., Mohammed, A., Wang, X. V., & Schmidt, B. (2018). Energy-efficient robot applications towards sustainable manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(8), 692-700.