

افزایش کارایی خط تولید و مونتاژ رگلاتور گاز با بهبود فرآیند تخصیص نیروی کار به عملیات با بهره‌گیری از رویکرد شبیه‌سازی کامپیوتری گسسته پیشامد

علیرضا منیری^{۱*}، پیمان خانجانی^۲، صدیق رئیسی^۳

دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۳

چکیده

همواره یکی از دغدغه‌های اصلی برنامه‌ریزان عملیات، تخصیص انسان - ماشین محسوب می‌شود. بهره‌گیری از شیوه مناسب به‌کارگیری نیروی انسانی در شرایطی که عملیات وابسته به توانمندی‌های نیروی کار است می‌تواند به ارتقاء شاخص‌های کارائی و بهره‌وری سیستم‌ها بیانجامد. از آنجایی که این مسائل در دسته‌بندی مسئله‌های np -hard قرار می‌گیرند، لذا بهینه‌سازی و حل دقیق مدل ریاضی این مسائل پیچیده است. در تحقیق حاضر با رویکرد شبیه‌سازی کامپیوتری به این موضوع توجه شده است و بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده و مطالعه دقیق جریان عملیات با بهره‌گیری از آزمون‌های فرض آماری، الگوها و مدل‌های عملیات و فرآیندها شناسائی شده‌اند. همچنین با استفاده از آزمون آماری ناپارامتری مناسب اعتبار مدل شبیه‌سازی احراز و میزان تولید روزانه گزینه‌های شدنی گوناگون تخصیص انسان - ماشین از طریق مدل شبیه‌سازی کامپیوتری با هم مقایسه گردیده است. بر این اساس مناسب‌ترین گزینه در خط تولید و مونتاژ رگلاتورهای گاز معرفی شده است. در این رویکرد نتایج شبیه‌سازی نشان داد که می‌توان با انتخاب شیوه مناسب در کارگماری نیروی انسانی با سطح اطمینان ۹۵ درصد متوسط تولید روزانه را ۲۵ درصد افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: کارایی، خط تولید و مونتاژ، شبیه‌سازی، تخصیص نیروی کار

۱- مقدمه

موضوع برای صاحبان فرآیند و سیستم‌ها اهمیت می‌یابد. در سیستم‌های تولیدی، باید فرآیندها طوری برنامه‌ریزی شوند که بهینه‌ترین حالت را در ارتباط با استفاده از منابع در راستای بیشترین راندمان ایجاد کنند، این برنامه‌ریزی بدون تجزیه و تحلیل‌های دقیق و منطقی امکان‌پذیر نیست. در تجزیه و تحلیل سیستم‌ها، مدل‌سازی مناسب، به عنوان یک اصل پذیرفته شده است. بنابراین هرچقدر یک سیستم پیچیده‌تر باشد، مدل‌سازی تحلیل و برنامه‌ریزی در آن سخت‌تر می‌باشد. در این میان می‌توان به سیستم‌هایی اشاره نمود که دارای رفتارهای غیرقطعی می‌باشند. در این سیستم‌ها داشتن یک نگاه علمی و ابزار مناسب در جهت مدل‌سازی و تحلیل ضرورت بیشتری دارد. مدل‌سازی ریاضی در این مواقع به علت پیچیدگی باعث می‌شود که محدودیت‌هایی را قائل شد که معمولاً نتایج آن با واقعیت تفاوت‌های معناداری را دارد. تاکنون ابزارهای مختلفی برای

یک سیستم در حالت کلی، متشکل از ورودی‌ها، فرآیندها و خروجی‌ها می‌باشد که برای رسیدن به اهداف مشخص با یک منطق در تعامل می‌باشند. خروجی‌ها باید حداقل‌های مورد انتظار را از لحاظ کمیت و کیفیت داشته باشند و در طول زمان بهبود یابند. در دنیای کنونی ارتقا وضعیت سیستم‌ها بیش از گذشته مورد توجه می‌باشد و این

* ۱- عضو هیأت علمی (مربی) دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر، گروه مهندسی صنایع، نویسنده مسئول، نشانی: ملایر، بالاتر از پارک سیفیه، بلوار دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی ملایر، کدپستی: ۶۵۷۱۹۶۱۶۶۸، پست الکترونیکی: st_ar_moniri@azad.ac.ir

۲- مسئول سیستم‌ها و روش‌های مجتمع فولاد ویان، پست الکترونیکی: khanjani9631@gmail.com

۳- دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، گروه مهندسی صنایع، پست الکترونیکی: raissi@azad.ac.ir

4- Non-deterministic Polynomial-time Hard

احتمالی تعریف شده است، یک مدل ابتکاری ارائه نموده‌اند که در آن مدل از هفت راهبرد انتخابی استفاده شده است و عملکرد آن بر مبنای یک آزمایش شبیه‌سازی با شش مشکل خط تولید سنجدیده می‌شود. لی یو^۴(۱۹۹۷) [۴]، به دنبال یک مدل بهینه با استفاده از الگوریتم‌های ریاضیاتی جهت حل مشکل تنظیم یک خط مونتاژ با عوامل احتمالی می‌باشد. در این مقاله سه الگوریتم مورد بررسی قرار گرفته و سپس الگوریتم بهینه با روش‌های محاسباتی ارائه گردیده است. در این مقاله از تحلیل آشفستگی^۵، جهت تحلیل سیستم دینامیکی وقایع گسسته استفاده شده است.

خدابنده و همکاران [۵]، یک مسئله یکپارچه‌سازی تولید و توزیع را با هدف حداقل‌سازی مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری و هزینه‌های حمل و نقل مورد بررسی قرار دادند که در نهایت یک مدل برنامه‌ریزی مختلط و یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله پیشنهاد دادند.

زی^۶ و همکاران (۲۰۰۱) [۶]، با استفاده از مدل‌های ریاضی و مقایسه آنها با یکدیگر، یک تخصیص بهینه جریان مواد در ماشین‌آلات را انجام می‌دهند، به طوری که چرخه زمانی تولید محصول در یک خط مونتاژ کمینه می‌شود.

پیروال^۷ و دیگران (۲۰۰۳) [۷]، با بررسی نگرش‌های ابتکاری در جهت حل مسئله، راهکارهای طراحی یک سیستم تولیدی را درجایی که از این الگوریتم‌های ابتکاری استفاده می‌شود مورد بررسی قرار می‌دهند و الگوریتم‌های مرتبط با برنامه‌ریزی و تنظیم خط تولید در مقالات ارائه شده در سال‌های اخیر را مورد بررسی قرار می‌دهند. در این تحقیق، چشم‌انداز آینده، استفاده از نگرش‌های پویا در طراحی سازمان‌ها و سیستم‌های تولیدی است.

فان^۸ و دیگران (۲۰۱۰) [۸]، به دنبال یک موازنه در حجم کار و نرخ به‌کارگیری منابع در یک خط مونتاژ با استفاده از مدل‌های ریاضی می‌باشد. این مدل‌های ریاضی تحت شرایط قطعیت و عدم قطعیت مدل‌سازی شده و جواب‌های حاصله در آن در ارزیابی و بهبود سیستم مؤثر می‌باشد. اویکال^۹ و دیگران (۲۰۱۳) [۹]، برای بهبود بهره‌وری نیروی انسانی از یک مدل ابتکاری با استفاده از روش مسیر بحرانی و در شرایط وجود خط تولید U شکل استفاده کرده و سپس کارایی این

این نوع مسائل استفاده شده است که در بررسی پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از راهکارهایی که می‌تواند به تحلیل گران سیستم در این زمینه کمک نماید، رویکرد شبیه‌سازی کامپیوتری سیستم‌ها می‌باشد.

امروزه، با توجه به توسعه سیستم‌های نرم‌افزاری، یکی از روش‌ها و ابزارهای قدرتمند در زمینه بهینه‌سازی فرآیندهای تولیدی استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی می‌باشد که مدیران می‌توانند پیش از اجرای یک سیستم، بررسی‌های لازم را در خصوص هزینه، سود، راندمان و ... به عمل آورده و تصمیمات بهتری اتخاذ نمایند [۱]. مزیت اصلی یک شبیه‌سازی، قابلیت WIA^۱ می‌باشد و این به معنای تحلیل بر مبنای تغییرات در دنیای مجازی است. مبنای کار در شبیه‌سازی کامپیوتری سعی و خطاهای هدایت شده بر حالت‌های مختلف می‌باشد که در نهایت هر حالت به‌طور مستقیم بر شاخص‌های کارایی در یک سیستم اثر گذاشته و تحلیل این حالت‌ها منجر به برنامه‌ریزی در آن سیستم می‌شود. در سیستم‌های تولیدی نیز از این رویکرد به‌طور مؤثر می‌توان استفاده نمود. این سیستم‌ها با توجه به وجود عدم قطعیت و پیچیدگی در زنجیره تأمین، تولید و توزیع جزو سیستم‌های پیچیده محسوب می‌شوند و استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری در آنها می‌تواند در تحلیل دقیق، درست و برنامه‌ریزی، ما را یاری کند.

مدل‌سازی در سیستم‌های تولیدی و برنامه‌ریزی آنها در جهت بهبود، داری طیف وسیعی از مطالعات می‌باشد. در بررسی پیشینه تحقیق در این سیستم‌ها، مطالعاتی وجود دارد که با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و حل آن، بهبود مورد نظر پیشنهاد شده است. این نوع تحقیقات، در گروه (الف) ذکر شده است. در مقابل، مطالعاتی وجود دارد که سیستم‌ها را با استفاده از مدل‌های کامپیوتری، شبیه‌سازی نموده و بهبودها را در نظر می‌گیرند. این نوع تحقیقات نیز در گروه (ب) آورده شده است.

در مطالعات گروه (الف)، بهبودهای یک سیستم تولیدی با بهینه‌یابی و توزان در متغیرهای مورد نظر مسئله انجام می‌گیرد. کبیر و تابوکانون^۲ (۱۹۹۵) [۲]، از یک رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره جهت تخمین تعداد ایستگاه‌های خط مونتاژ استفاده نموده‌اند که این رویکرد به‌طور سنتی جهت تنظیم و بهبود خط تولید استفاده شده است. مولن و فرازیر^۳ (۱۹۹۷) [۳] برای تخصیص زمان عملیات که به‌صورت

4- Lyu
5- Perturbation analysis
6- Sze
7- Pierreval
8- Fan
9- Avikal

1- What If Analysis
2- Kabir & Tabucanon
3- Mullen & Frazier

مدل را با استفاده از یک مثال، محاسبه می‌کنند. در نهایت با اعمال نتایج در ایستگاه‌های خط تولید، بهبود سطوح بهره‌وری نیروی انسانی نشان داده می‌شود. ملایی (۱۳۹۱) [۱۰]، جهت تقسیم کارها به ایستگاه‌های خط مونتاژ در مسئله بالانس، یک الگوریتم فراابتکاری چند معیاره مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید ارائه کرده و در تحلیل‌های آماری و نتایج محاسباتی برتری این الگوریتم بر سایر الگوریتم‌های مشابه را نشان داده است.

در مطالعات گروه (ب)، اسپدینگ^۱ و دیگران (۱۹۹۷) [۱۱]، سعی در ایجاد یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری با استفاده از مدل‌سازی ساختار یک خط مونتاژ در نرم‌افزار Arena دارند. سیستمی که بتواند به‌طور آنی خط مونتاژ را شبیه‌سازی نموده و اطلاعات آن را جهت تصمیم‌گیری در فرآیند تولید مورد استفاده قرار دهد. سعد و بینر^۲ (۱۹۹۸) [۱۲]، سعی دارند با تحلیل شاخص‌های عملکردی یک سیستم تولیدی، اثرگذاری آنها را بر یکدیگر مشخص کنند. این تحلیل‌ها همچنین با استفاده از تحلیل واریانس و شبیه‌سازی کامپیوتری انجام پذیرفته است. راجاکومار^۳ و دیگران (۲۰۰۵) [۱۳] با استفاده از یک برنامه‌ریزی شبیه‌سازی کامپیوتری که توسط کدنویسی در ++C انجام یافته است یک تخصیص مطلوب کار به اپراتور را با توجه به سه راهبرد مختلف زمان‌بندی انجام داده‌اند. مندس^۴ و دیگران (۲۰۰۵) [۱۴] یک مدل ترکیبی بالانس خط مونتاژ را ارائه کردند که هدف آن تنظیم خط تولید براساس سطح متغیر تقاضا است. آنها با استفاده از روش فرا ابتکاری تبرید و با هدف کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها و حجم کار بین ایستگاه‌ها جواب‌هایی را به‌دست می‌آورند و آنها را به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های شبیه‌سازی گسسته - پیشامد در جهت یافتن یک آرایش مناسب خط مونتاژ، مورد استفاده قرار می‌دهند. وانگ^۵ و دیگران (۲۰۱۱) [۱۵] یک سیستم تولید منعطف و سفارشی را براساس تقاضای بازار در نظر گرفته‌اند. در این مدل با استفاده از شبیه‌سازی داده‌ها و با در نظر گرفتن تقاضای بازار، اطلاعات به‌صورت اتوماتیک به سیستم خط تولید منتقل شده و الزامات آن به‌صورت پویا در نظر گرفته می‌شود. در نهایت با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری تحلیل انتقال

مواد و خط مونتاژ انجام می‌پذیرد. فریرا^۶ و دیگران (۲۰۱۲) [۱۶] یک سیستم مونتاژ را با داشتن چهار حلقه بسته در نظر گرفته‌اند که با استفاده از شبیه‌سازی به دنبال تعیین تعداد کل پالت‌های موجود در حلقه و طول صف بین عملیات‌های مختلف می‌باشد، به‌طوری‌که عملکرد خط مونتاژ بیشینه‌گردد. افشار کاظمی و همکاران (۱۳۹۱) [۱۷] در یک شبیه‌سازی گسسته- پیشامد برای خط تولید میلگرد، به بررسی تعداد جرثقیل‌های مورد نیاز با توجه به سرعت خط پرداخته و در نهایت با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری، جواب مؤثر را شناسایی و ارائه کرده‌اند.

تیاسی^۷ (۲۰۱۲) [۱۸] براساس یک ابزار شبیه‌سازی توسعه داده شده در جاوا برای یک خط مونتاژ که دارای زمان‌های عملیات احتمالی، ایستگاه‌های کاری موازی و توالی ثابت انجام عملیات می‌باشد، چند مدل خط مونتاژ شبیه‌سازی نموده است. در ادامه پیشنهادهایی جهت بهبود عملکرد خط مونتاژ و موازنه خط ارائه شده است.

در مطالعات اخیر توجه به بالانس خط تولید^۸ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است، به‌طوری‌که بونو سونگور^۹ و دیگران (۲۰۱۴) [۱۹] در مقاله خود به بررسی مسئله بالانس خطوط تولید سلسله مراتبی^{۱۰} پرداختند. در این خطوط تولیدی کارگر با شایستگی بالاتر جانشین کارگری با شایستگی کمتر می‌شود، به‌طوری‌که کارگری که شایستگی بالاتری دارد هزینه بالاتری را به سازمان تحمیل می‌کند. این مسئله از طریق برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت پاسخ‌های بهینه انتخاب شد. در بررسی مایرون سزار^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۵) [۲۰] نیز مشکل بالانس خط تولید و ادغام کارگران از طریق راه‌حل‌های فرا ابتکاری مورد بررسی قرار گرفته است. این نوع مسائل در حوزه مسائل بالانس و ادغام کارگران در خط مونتاژ^{۱۲} قرار می‌گیرند. هدف اصلی این مقاله نیز کاهش تعداد ایستگاه‌های کاری و افزایش راندمان در خط مونتاژ می‌باشد.

6- Ferreira
7- Tiacci
8- Line Balancing
9- Banu Sungur
10- ALBHW
11- Mayron César
12- ALWIBP

1- Spedding
2- Saad & Byrne
3- Rajakumar
4- Mendes
5- Wang

در مقاله رضا رمضانیان^۱ و همکاران (۲۰۱۵) [۲۱] مسئله مدل ترکیبی بالانس خط مونتاژ و تخصیص کارگر^۲ مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل، این امکان وجود دارد که با بهینه‌سازی خطوط و کارگران، مجموعه‌ای از محصولات در یک خط مونتاژ، تولید شود. هدف اول مینیمم‌سازی زمان سیکل می‌باشد و دومین هدف آن کاهش هزینه‌ها است. بر این اساس با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی این مسئله مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در مقاله ابراهیم کاکوک^۳ و همکاران (۲۰۱۵) [۲۲] نیز یک مدل بالانس خطوط مونتاژ U شکل مورد بررسی قرار گرفته است که یک طراحی از خطوط مونتاژ ترکیبی را در بر می‌گیرد. مزیت این تحقیق ترکیبی خطوط مونتاژ موازی با خطوط مونتاژ U شکل می‌باشد. این مقاله در نهایت با بررسی دو نوع خط مونتاژ نشان می‌دهد که خطوط U شکل به میزان بیشتری در مقایسه با خطوط موازی می‌توانند بهینه‌گردند.

قدیر بویوکزکا^۴ و همکاران (۲۰۱۶) [۲۳] یک مدل ترکیبی بالانس خط تولید را با استفاده از دیدگاه جستجوی ممنوع و کلونی زنبور عسل و با استفاده از پارامترهای بهینه بررسی کردند. در این مقاله توزیع حجم کاری در ایستگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، به طوری که تعداد ایستگاه‌های کاری بهینه شده و راندمان کارگران افزایش یابد.

در تحقیق حاضر و در قسمت ۲، مدل مفهومی از خط تولید و مونتاژ رگلاتور گاز ارائه می‌شود و در قسمت ۳، مدل کامپیوتری آن با استفاده از قابلیت‌های ویژه نرم‌افزار ED طراحی می‌گردد. در قسمت ۴، با توجه به مدل کامپیوتری ارائه شده، برای عملیات‌های مختلف، جمع‌آوری داده و تحلیل آماری انجام می‌شود. در قسمت ۵، متوسط تولید روزانه را به عنوان شاخص کارایی در نظر گرفته و مدل در شرایط فعلی سیستم، چندین بار اجرا و نتایج آن ثبت می‌شود و در ادامه برای سنجیدن اعتبار نتایج مدل از یک آزمون ناپارامتری استفاده می‌گردد. در قسمت ۶، برای ارزیابی و بهبود این سیستم، سناریوها را در جهت موازنه تعداد نیروی انسانی در هر ایستگاه کاری در نظر می‌گیرند.

هر یک از سناریوها در مدل شبیه‌سازی اجرا شده و شاخص کارایی آن به دست می‌آید و بهترین سناریو به عنوان بهبود در نظر گرفته می‌شود. قسمت ۷ نیز به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- تشریح مسئله

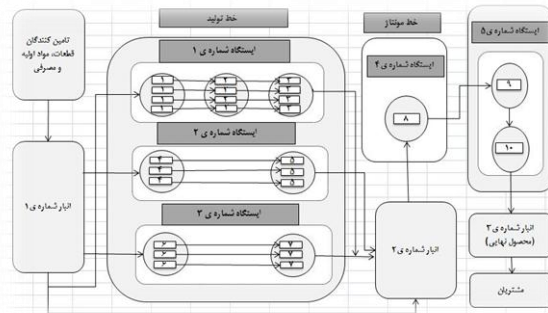
در این مقاله یک شرکت تولید رگلاتورهای گاز با خطوط تولید مختلف در نظر گرفته شده که هر خط تولید از چند ایستگاه تشکیل شده است. در هر خط باید تعادل خط تولید صورت پذیرد و این به معنای استفاده از بهینه‌ترین حالات منابع شامل نیروی انسانی، مواد اولیه، تجهیزات و ... می‌باشد. چنین شرایطی یک مسئله np-hard را می‌سازد که در تحلیل آن به علت پیچیدگی می‌توان شبیه‌سازی را جایگزین نمود.

در این تحقیق، یک خط مونتاژ و تولید رگلاتور گاز در نظر گرفته شده است. در این سیستم تولید و مونتاژ، سه انبار وجود دارد به طوری که، قطعات و مواد اولیه توسط تأمین‌کنندگان در انبار شماره ۱ قرار می‌گیرند. شمش‌های آلومینیوم، سیم‌های فولادی، مواد پلاستیکی و قطعات مصرفی مورد نیاز در خط مونتاژ، از جمله موجودی این انبار می‌باشند. در انبار شماره ۲، قطعات تولید شده در خط تولید و قطعات خریداری شده از تأمین‌کنندگان قرار گرفته‌اند. در انبار شماره ۳ نیز محصول نهایی قرار دارد. در این سیستم، ۱۰ عملیات مستقل از هم وجود دارد و آنها در قالب ۵ ایستگاه تقسیم‌بندی شده‌اند. برخی از این عملیات‌ها برای تولید محصولاتی که دارای فرآیند ساخت یکسان می‌باشند، تکرار می‌شوند. به عنوان مثال در ایستگاه شماره ۱، چهار قطعه متفاوت که فرآیند ساخت یکسان دارند ساخته می‌شود. قطعات تولیدی در تمام عملیات‌ها به جز عملیات ۸ و ۱۰، به صورت دسته‌های ۱۰ تایی به عملیات بعدی منتقل می‌شوند. محصول تولید شده در عملیات ۸ و ۹ نیز توسط تسمه نقاله به طول ۱۰ متر به مرحله بعدی فرستاده می‌شود. در نهایت محصول بسته‌بندی شده، توسط لیفتراک به انبار شماره ۳، انتقال می‌یابد. نمودار جریان موجودیت‌های این سیستم در شکل (۱) نشان داده شده است.

1- Ramezani
2- MMALBWAP
3- Kucukkoc
4- Buyu kozkana

جدول (۱): شرح عملیات‌های سیستم تولید رگلاتور

انواع محصول	تعداد عملیات	مواد و قطعات	نام عملیات	شماره ی عملیات	ایستگاه کاری
۴	۴	شمش آلومینیوم	ریخته‌گری	۱	۱
	۴	خروجی عملیات ۱	ماشین کاری	۲	
	۴	خروجی عملیات ۲	رنگرزی	۳	
۳	۳	سیم فولادی	فنر سازی	۴	۲
	۳	خروجی عملیات ۴	آبکاری	۵	
۳	۳	مواد پلاستیکی و مصرفی	تزریق پلاستیک	۶	۳
	۳	خروجی عملیات ۶	پلیسه‌گیری	۷	
۱	۱	خروجی عملیات‌های ۳ و ۵ و ۷ و سایر قطعات مصرفی	مونتاژ	۸	۴
۱	۱	خروجی عملیات ۸	تست محصول	۹	۵
	۱	خروجی عملیات ۹	بسته‌بندی	۱۰	



شکل (۱): جریان موجودیت‌های سیستم تولید رگلاتور گاز

در ایستگاه شماره ۱، چهار قطعه تولید می‌شود که پوسته محصول را تشکیل می‌دهد. در ایستگاه شماره ۲، سه نوع فنر تولید می‌شود که در ساختار درونی رگلاتور استفاده می‌شود. در ایستگاه شماره ۳، سه نوع قطعه پلاستیکی تولید می‌شود که جزو قطعات اصلی یک محصول به شمار می‌آید. مابقی قطعات مصرفی نیز از انبار شماره ۱ به انبار شماره ۲، انتقال می‌یابد و در ایستگاه چهارم، محصول نهایی تولید می‌گردد. ایستگاه پنجم نیز محصول تولید شده را آزمایش نموده و در بسته‌های ۱۰ تایی به انبار ۳، انتقال می‌دهد. هر یک از عملیات‌ها بسته به نوع کاری که انجام می‌دهند، از یک یا چند نیروی انسانی استفاده می‌کنند. این افراد، در قالب تیم‌های عملیاتی متفاوت در عملیات‌های ۱۰ گانه تقسیم‌بندی شده‌اند. شرح عملیات‌های این سیستم، به شرح جدول (۱) می‌باشد.

طراحی مدل شبیه‌سازی کامپیوتری

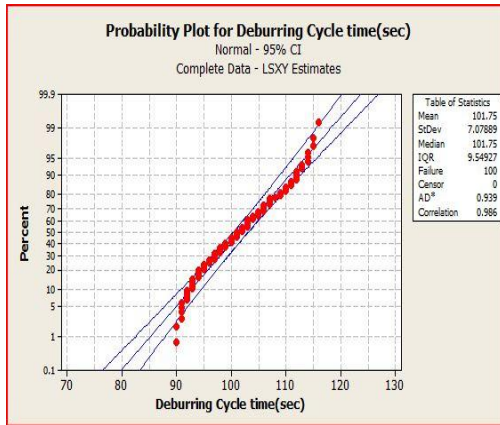
برای برگردان مدل مفهومی مسئله به شبیه‌سازی کامپیوتری از بسته نرم‌افزاری ED³ استفاده شده است. شکل شماره (۲) طرح جانمایی مدل را نشان می‌دهد. در این مدل، متناسب با دنیای واقعی، پنج ایستگاه کاری به تفکیک طراحی شده و نیروی انسانی با سطح مهارت یکسان برای عملیات‌های مشابه، در قالب تیم‌های عملیاتی تخصیص یافته است. خروجی‌های عملیات‌های مختلف نیز با تعریف انبارهای موقت و صف‌ها طراحی گردیده است.

در شکل (۲) ایستگاه‌ها به ترتیب چیدمان در نرم‌افزار ED³ شبیه‌سازی شده‌اند. بر این اساس از ابتدای ورود شمش‌های آلومینیوم تا زمانی که محصول به‌طور کامل آزمایش و بسته‌بندی می‌شود در شکل آمده است. در این شکل کارهای نامگذاری شده، ایستگاه‌ها را نمایش می‌دهند که شامل دایکاست، ماشین کاری، رنگ، ساخت قطعات داخلی و آبکاری آن و کارگاه‌های تزریق پلاستیک و پلیسه‌گیری می‌باشند. هر خط نشان‌دهنده تولید یک بخش از محصولات مونتاژی می‌باشد که در نهایت در ایستگاه شماره ۴، بخش‌های پیش‌ساخته روی هم مونتاژ شده و محصول نهایی را تولید می‌کنند. این محصولات در نهایت پس از آزمایش نهایی بسته‌بندی گردیده و برای مشتری ارسال می‌گردد. قبل از برخی از عملیات‌ها صف ایجاد شده از قطعات یا بخش‌های پیش‌ساخته (نیمه مونتاژ) نمایش داده شده که موجب توقف در یک ایستگاه می‌گردد. در هر ایستگاه تیم‌های

۱- مواد و قطعات مهم مورد نیاز

۲- انواع محصول تولید شده در هر ایستگاه

به منظور برآورد الگوی آماری مناسب برای برآزش زمان عملیات پلیسه‌گیری از نرم‌افزار آماری Minitab 16 استفاده شد. شکل شماره (۳) و (۴) به ترتیب نمودار احتمال - احتمال و نتایج آزمون نیکویی برآزش چندین توزیع آماری کاندید شده برای برآزش را به‌طور همزمان نشان می‌دهد.



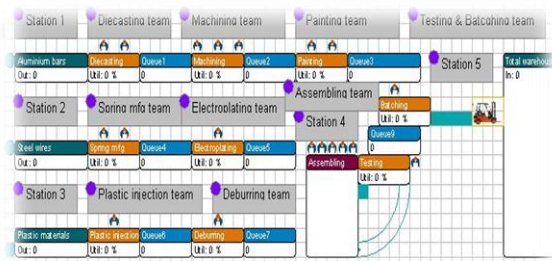
شکل (۳): نمودار احتمال برای عملیات پلیسه‌گیری

Distribution	Anderson-Darling (adj)	Correlation Coefficient
Weibull	4.060	0.949
Lognormal	0.855	0.987
Exponential	89.654	*
Loglogistic	1.496	0.974
3-Parameter Weibull	0.693	0.992
3-Parameter Lognormal	0.827	0.987
2-Parameter Exponential	12.720	*
3-Parameter Loglogistic	1.481	0.975
Smallest Extreme Value	4.947	0.941
Normal	0.939	0.986
Logistic	1.557	0.973

شکل (۴): نتایج شاخص‌ها برای توزیع‌های آماری

همان‌طور که ملاحظه می‌شود از میان توزیع‌های آماری کاندید شده برای برآزش، سه توزیع نرمال، نرمال لگاریتمی و نرمال لگاریتمی ۳ پارامتری به دلیل بالا بودن شاخص ضریب همبستگی و کم بودن شاخص اندرسون دارلینگ الگوهای مناسبی برای برآزش می‌باشند که در این میان به لحاظ آماری برآزش توزیع نرمال با میانگین $101/75$ و انحراف معیار $7/08$ با مقدار احتمال بیشتر به‌طور مناسب‌ترین الگو انتخاب می‌شوند. همین عملیات به‌طور مشابه برای سایر عملیات نیز تکرار گردید که نتایج نهایی در آزمون نیکویی برآزش آنها در جدول (۳) ذکر شده است.

کاری مختلفی فعالیت می‌کنند تا بتوانند در زمان مناسب، بیشترین محصول را بر اساس درخواست‌های مشتریان تحویل دهند.



شکل (۲): نمایش طراحی سیستم تولید رگلاتور در محیط نرم‌افزار ED

۴- جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل آماری

از آنجایی که در این خط تولید و مونتاژ، عملیات‌ها دارای زمان‌های غیرقطعی و احتمالی می‌باشند. با روش نمونه‌برداری از کار در زمان‌هایی که فرآیند شرایط عادی کار را دارد اقدام می‌گردد. برای این منظور بین ساعات ۱۰ الی ۱۱ صبح برای هر یک از عملیات‌ها، هر کدام بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ نمونه از زمان انجام عملیات ثبت شد که جدول فراوانی مشاهدات یک نمونه که تعلق به زمان عملیات پلیسه‌گیری است در جدول (۲) ذکر شده است.

جدول (۲): زمان عملیات پلیسه‌گیری (ثانیه)

فراوانی	زمان عملیات پلیسه‌گیری	فراوانی	زمان عملیات پلیسه‌گیری
۳	۱۰۴	۲	۹۰
۴	۱۰۵	۴	۹۱
۵	۱۰۶	۴	۹۲
۵	۱۰۷	۵	۹۳
۱	۱۰۸	۵	۹۴
۳	۱۰۹	۴	۹۵
۳	۱۱۰	۳	۹۶
۳	۱۱۱	۵	۹۷
۴	۱۱۲	۵	۹۸
۲	۱۱۳	۴	۹۹
۳	۱۱۴	۴	۱۰۰
۲	۱۱۵	۶	۱۰۱
۱	۱۱۶	۴	۱۰۲
۰	۱۱۷	۶	۱۰۳

جدول (۳): توزیع آماری عملیات‌های سیستم تولید رگلاتور گاز

عملیات	توزیع آماری زمان عملیات	نوع پارامتر	اندرسون دارلینگ	ضریب همبستگی	P-value
ریخته‌گری	نمائی منفی	مقیاس ۳۰/۵	۰/۸۸۳	۰/۹۸۸	۰/۵۹
ماشین‌کاری	یکنواخت	حداقل ۱۵۰ حداکثر ۱۶۰	۰/۴۹۲	۰/۸۷۰	۰/۶۱
رنگ‌رزی	لجستیک	مقیاس ۱۰/۳۳ موقعیت ۹۷/۶۲	۰/۴۶۲	۰/۹۹۱	۰/۶۵
فن‌سازی	یکنواخت	حداقل ۱۰۰ حداکثر ۱۲۰	۰/۵۳۱	۰/۹۱۰	۰/۶۸
آبکاری	نمائی منفی	۹۰	۰/۶۳۴	۰/۹۹۲	۰/۷۶
تزریق پلاستیک	نمائی منفی	۳۵	۰/۸۷۸	۰/۹۶۸	۰/۵۳
پلیسه‌گیری	نرمال	میانگین ۷/۰۸ انحراف معیار ۱۰۱/۷۵	۰/۹۳۹	۰/۹۳۹	۰/۲۵ p>
مونتاژ	لجستیک	مقیاس ۵۶/۳۸ موقعیت ۵۵۰/۷۷	۰/۳۸	۰/۹۸۹	۰/۵۷
آزمون کیفیت محصول	نمائی منفی	۶۰	۰/۶۳۲	۰/۹۷۹	۰/۵۵
بسته‌بندی	یکنواخت	حداقل ۱۰۰ حداکثر ۱۲۰	۰/۵۲۰	۰/۸۹۱	۰/۶۹۳

جدول (۴): شرح انبارهای موقت در خروجی عملیات‌های تولید رگلاتور گاز

شماره صف	ظرفیت	وضعیت جریان مواد در صف
۱	۱۰۰۰	تصادفی
۲	۱۰۰۰	تصادفی
۳	۱۰۰۰	تصادفی
۴	۱۰۰۰	تصادفی
۵	۱۰۰۰	تصادفی
۶	۱۰۰۰	تصادفی
۷	۱۰۰۰	تصادفی
۸	۱۰۰	FIFO
۹	۱۰۰۰	تصادفی
۱۰	۱۰۰	FIFO

تخصیص نیروی انسانی به عملیات‌های مختلف در هر ایستگاه‌کاری نیز در جدول (۵) ذکر شده است. در جدول شماره (۵)، تخصیص نیروی انسانی گاهی به صورت مجموع چند عدد نمایش داده شده است. این بدان معناست که در این مدل هر عملیات به یک گروه از نیروی انسانی نیازمند است. به عنوان مثال در عملیات ماشین‌کاری چهار عملیات مشابه در ایستگاه‌کاری ۱ وجود دارد و هر عملیات به ۲ نفر نیاز دارد. در یک زمان واحد به‌طور همزمان ۳ گروه عملیاتی قادر به خدمت‌دهی می‌باشند و یک عملیات بیکار است.

در این مدل، انبارهای موقت با بهره‌گیری از اتم صف شبیه‌سازی شده‌اند که اطلاعات اصلی آنها در جدول (۴) بیان شده است.

جدول (۵): شرح تخصیص نیروی انسانی به عملیات‌های

سیستم تولید رگلاتور گاز

ایستگاه کاری	نام عملیات	تعداد عملیات	تعداد نیروی انسانی مورد نیاز هر عملیات	شرایط فعلی تخصیص نیروی انسانی	تعداد عملیات مشابه بی کار	نیروی انسانی هر ایستگاه
۱	ریخته‌گری	۴	۲	۲+۲	۲	۱۳
	ماشین کاری	۴	۲	۲+۲+۲	۱	
	رنگرزی	۴	۱	۱+۱+۱	۱	
۲	فهرسازی	۳	۱	۱+۱	۱	۴
	آبکاری	۳	۱	۱+۱	۱	
۳	تزریق پلاستیک	۳	۱	۱	۱	۳
	پلیسه‌گیری	۳	۱	۱	۱	
۴	مونتاژ	۱	۱۰	۱۰	۰	۱۰
۵	تست محصول	۱	۱	۱	۰	۲
	بسته‌بندی	۱	۱	۱	۰	

۵- شبیه‌سازی وضعیت کنونی و اعتبارسنجی مدل

با توجه به مدل طراحی شده کامپیوتری در نرم‌افزار ED، باید شرایط کنونی سیستم تولید و مونتاژ در قالب تنظیماتی برای این نرم‌افزار تعریف شود. بخشی از این تنظیمات مربوط به اطلاعاتی است که در بخش ۵ به آنها اشاره شد. برای هر یک از عملیات‌ها، زمان عملیات تعریف شده و اطلاعات صف‌های موجود نیز وارد می‌گردند. در نهایت برای هر عملیات، تیم‌های عملیاتی تعریف شده و سپس با توجه به شرایط فعلی تخصیص نیروی انسانی، نیروی‌های انسانی موجود از تیم‌ها فراخوان می‌شود تا به محض انجام عملیات تخصیص یابند. در این تخصیص باید به تعداد مورد نیاز نیروی انسانی برای هر عملیات تخصیص

یابند. برای انجام این تنظیمات، در قالب کدنویسی به زبان DScript4، انجام می‌شود. به عنوان نمونه برای عملیات ریخته‌گری دستور زیر برای فراخوان ۲ اپراتور حسب لزوم و آزادسازی آنها پس از خاتمه عملیات استفاده شده است.

Trigger on entry: *CallOperators(AtomByName ([Diecasting team],Model),2)*,

Trigger on exit: *FreeOperators(AtomByName ([Diecasting team],Model),i)*

به منظور کسب نتایج مطلوب و با دقت آماری قابل قبول شبیه‌سازی سیستم بین ۱۰ هزار ساعت تنظیم می‌شود و برای حذف آثار نااریبی به واسطه شرایط اولیه، ۱۰۰۰ ساعت اول را به عنوان دوره دست‌گرمی در نظر گرفته می‌گیرند و نتایج این دوره بدون اثرگذاری در شاخص‌های برآورد شده شبیه‌سازی، به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته می‌شود. همچنین جهت افزایش دقت، تعداد اجراها ۲۵ بار تنظیم می‌گردد که بدین معنی است که در مجموع زمان مؤثر شبیه‌سازی ۲۲۵۰۰۰ ساعت در نظر گرفته شده است. در این مدل، متوسط تولید روزانه به عنوان اصلی‌ترین شاخص کارایی سیستم و متغیر پاسخ شبیه‌سازی تعریف می‌شود. بنابراین خروجی‌های شبیه‌سازی برای این شاخص استخراج می‌گردد. در جدول شماره (۶) نتایج حاصل از شبیه‌سازی این سیستم ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از تولید روزانه رگلاتور، با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان گفت که متوسط تولید روزانه بین ۹۵ تا ۱۰۳ عدد می‌باشد. جهت تحلیل یک سیستم، داشتن اطلاعات واقعی یا نزدیک به واقعیت از اهمیت زیادی برخوردار است. در یک مدل با داشتن ورودی‌های نادرست، قطعاً خروجی‌های نادرست نیز خواهیم داشت. جهت دوری از این رویداد، آزمون اعتبار مدل شبیه‌سازی شده انجام گردید. برای این منظور، مقدار تولید روزانه که در ۲۵ اجرای مدل شبیه‌سازی حاصل شده بود با ۱۰ مقدار تولید روزانه واقعی به کمک آزمون دو نمونه‌ای ناپارامتری مان-ویتنی به لحاظ تساوی میانگین‌ها با استفاده از توسط نرم‌افزار Minitab16 مورد تحلیل قرار گرفت. مقدار احتمال ۰/۶۴ بزرگ‌تر از سطح تشخیص ۰/۰۵ نشان از تأیید اعتبار مدل شبیه‌سازی طراحی شده دارد. بنابر این می‌توان به نتایج شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت آن اطمینان داشت.

جدول (۶): نتایج اجرای ۲۵ بار شبیه‌سازی برای متوسط تولید روزانه (واحد زمان: ۱۰۰۰ ساعت)

شماره اجرا	زمان شبیه‌سازی	متوسط تولید روزانه	شماره اجرا	زمان شبیه‌سازی	متوسط تولید روزانه
۱	۹	۱۰۰	۱۴	۹	۱۰۰
۲	۱۰	۹۸	۱۵	۹	۹۹
۳	۱۰	۹۸	۱۶	۱۰	۹۷
۴	۹	۹۹	۱۷	۹	۱۰۰
۵	۸	۱۰۱	۱۸	۸	۱۰۲
۶	۸	۱۰۱	۱۹	۸	۱۰۳
۷	۹	۱۰۰	۲۰	۱۰	۹۵
۸	۱۰	۹۸	۲۱	۱۰	۹۶
۹	۱۰	۹۸	۲۲	۹	۱۰۰
۱۰	۱۰	۹۶	۲۳	۸	۱۰۳
۱۱	۱۰	۹۸	۲۴	۱۰	۹۷
۱۲	۸	۱۰۱	۲۵	۹	۹۹
۱۳	۸	۱۰۱	-	-	-

۶- طراحی سناریوهای بهبود

در مدل‌های معتبر شبیه‌سازی، یکی از مهم‌ترین مزیت‌ها در جهت تجزیه و تحلیل سیستم، انجام تحلیل حساسیت در مدل مجازی می‌باشد. این کار باعث می‌شود که از سعی و خطا در دنیای واقعی که علاوه بر صرف هزینه، زمان بر نیز می‌باشند، اجتناب شود. در واقع سعی و خطاهای هدایت شده بر سناریوهای مختلف پیشنهادی که قابلیت اجرا دارند پیگیری می‌شود تا گزینه مناسب برای اعمال تغییر در دنیای واقعی شناسایی شود. هدف نهایی یک سیستم، انجام مجموعه اقدامات هوشمندانه در جهت افزایش کارایی و بهره‌وری می‌باشد. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کارایی در یک سیستم تولید و مونتاژ، افزایش حجم تولید با منابع ثابت می‌باشد. در این مقاله برای تحلیل مدل شبیه‌سازی

شده با رویکرد بهبود، یک راهبرد در نظر گرفته شده است که حالت‌های بهبود توسط آنها تعریف شده و در نهایت مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. راهبرد در نظر گرفته شده بر موازنه و انتخاب تعداد نیروی انسانی در هر ایستگاه کاری در جهت بهبود شاخص کارایی متمرکز می‌باشد. برای این منظور، ابتدا متغیرهای زیر تعریف شده است.

$$x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{21}, x_{22}, x_{31}, x_{32}, x_{41}, x_{51}, x_{52}$$

در این متغیرها، اندیس اول شماره ایستگاه کاری و اندیس دوم شماره عملیات را نشان می‌دهد. هر یک از متغیرها، تعداد و دسته‌بندی نیروی انسانی را برای ایستگاه‌ها و عملیات‌های مختلف نمایش می‌دهد. به طوری که در هر یک از ایستگاه‌ها این متغیرها قابلیت تغییر را دارند. با توجه به مدل مفهومی این سیستم، به علت وجود یک عملیات در ایستگاه‌های کاری ۴ و ۵، و همچنین یک نیروی انسانی برای هر عملیات در ایستگاه ۳، برای این ۳ ایستگاه حالتی وجود ندارد. در این سیستم معادلات زیر را خواهیم داشت:

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} = 13,$$

$$x_{21} + x_{22} = 4,$$

$$x_{31} + x_{32} = 3,$$

$$x_{41} = 10,$$

$$x_{51} = 1,$$

$$x_{52} = 1$$

حالت‌های مختلف موجود در این سیستم در ۲۱ حالت خلاصه می‌شود و نتایج آن برای متوسط تولید در جدول (۷)، ذکر شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حالت ۹، بیشترین میزان متوسط تولید با در نظر گرفتن تعداد نیروی انسانی ثابت در هر ایستگاه رخ داده است و می‌تواند به عنوان یک برنامه نیروی انسانی در هر ایستگاه استفاده شود. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در صورتی که حالت ۹ در روز سیستم پیاده‌سازی شود، متوسط تولید از ۹۹ عدد در روز به ۱۲۸ عدد تغییر خواهد یافت و این به معنای حداقل ۲۰ درصد بهبود در سیستم محسوب می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با بهره‌گیری از شبیه‌سازی کامپیوتری نشان داده شده که چگونه می‌توان با تغییر نحوه تخصیص نیروی کار به عملیات تولیدی، تولید روزانه یک سیستم تولید و مونتاژ را بهبود داد. مدل طراحی شده متناسب با مدل مفهومی واقعی کارخانه بوده و تمام الگوها براساس داده‌های واقعی جمع‌آوری شده و بر اجرای آزمون‌های آماری معتبر استوار بوده است. نتایج شبیه‌سازی در شرکت تولید رگلاتور نشان می‌دهد که:

- ۱- این مدل واقع بینانه است و یک ارتباط منطقی و معتبر بین دنیای واقعی و فضای مجازی ایجاد می‌کند.
 - ۲- این مدل منعطف می‌باشد و قادر است با تعریف راهبردهای جدید بهبود، عملکرد سیستم را برای حالت‌های مختلف و ممکن ارزیابی نمود.
 - ۳- این مدل با در نظر گرفتن حالات مختلف در نرم‌افزار ED، در زمانی کوتاه، جواب‌هایی با دقت فراوان ارائه می‌دهد.
 - ۴- این مدل قابلیت گسترش در سایر سیستم‌های تولید و مونتاژ را در آینده دارد و می‌تواند به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری استفاده شود.
- در این تحقیق، هدف و راهبردهای مورد توجه، موازنه نیروی انسانی در خط تولید شرکت تولیدکننده رگلاتورهای گاز شهری بوده است و نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از این مدل پیشنهادی، متوسط تولید روزانه به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان ادعا نمود که حداقل ۲۰ درصد، متوسط تولید روزانه در شرایط تعداد نیروی انسانی ثابت، افزایش یافته و یک بهبود چشمگیر در سیستم رخ می‌دهد.

منابع

- [۱] حسین‌زاده، یعقوب. "بهینه‌سازی خطوط چند محصولی با استفاده از ابزار شبیه‌سازی"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، ۱۳۸۷.
- [2] Kabir, M.A. and M.T. Tabucanon, Batch-model assembly line balancing: A multiattribute decision making approach. International Journal of Production Economics, 1995. 41(1-3): p. 193-201.
- [3] McMullen, P.R. and G.V. Frazier, A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. International

جدول (۷): نتایج متوسط تولید برای حالت‌های مختلف

متوسط تولید روزانه	X ₂₂	X ₂₁	X ₁₃	X ₁₂	X ₁₁	سنا ریو
۹۹	۱+۱	۱+۱	۱+۱+۱	۲+۲+۲	۲+۲	وضعیت کنونی
۱۰۴	۱+۱	۱+۱	۱+۱+۱	۲+۲+۲+۲	۲	۲
۵۶	۱+۱	۱+۱	۱+۱+۱	۲+۲	۲+۲+۲	۳
۳۰	۱+۱	۱+۱	۱+۱+۱	۲	۲+۲+۲+۲	۴
۴۵	۱+۱	۱+۱	۱	۲+۲+۲	۲+۲+۲	۵
۵۷	۱+۱	۱+۱	۱	۲+۲+۲+۲	۲+۲	۶
۵۲	۱+۱	۱+۱	۱	۲+۲	۲+۲+۲+۲	۷
۱۱۷	۱+۱+۱	۱	۱+۱+۱	۲+۲+۲	۲+۲	۸
۱۲۸	۱+۱+۱	۱	۱+۱+۱	۲+۲+۲+۲	۲	۹
۱۰۹	۱+۱+۱	۱	۱+۱+۱	۲+۲	۲+۲+۲	۱۰
۶۰	۱+۱+۱	۱	۱+۱+۱	۲	۲+۲+۲+۲	۱۱
۴۴	۱+۱+۱	۱	۱	۲+۲+۲	۲+۲+۲	۱۲
۵۱	۱+۱+۱	۱	۱	۲+۲+۲+۲	۲+۲	۱۳
۶۶	۱+۱+۱	۱	۱	۲+۲	۲+۲+۲+۲	۱۴
۷۸	۱	۱+۱+۱	۱+۱+۱	۲+۲+۲	۲+۲	۱۵
۸۸	۱	۱+۱+۱	۱+۱+۱	۲+۲+۲+۲	۲	۱۶
۳۹	۱	۱+۱+۱	۱+۱+۱	۲+۲	۲+۲+۲	۱۷
۷۸	۱	۱+۱+۱	۱+۱+۱	۲	۲+۲+۲+۲	۱۸
۶۳	۱	۱+۱+۱	۱	۲+۲+۲	۲+۲+۲	۱۹
۵۵	۱	۱+۱+۱	۱	۲+۲+۲+۲	۲+۲	۲۰
۴۱	۱	۱+۱+۱	۱	۲+۲	۲+۲+۲+۲	۲۱

- [16] Ferreira, L., et al., Analysis and optimisation of a network of closed-loop automobile assembly line using simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012. 59(1-4): p. 351-366.
- [۱۷] افشار کاظمی، محمد علی، البرزی، محمود، محبوب، شادی. "روش شبیه‌سازی خط تولید میلگرد و تعیین تعداد جواب‌های غیرمسلط برای جرثقیل‌های خط تولید". فصلنامه پژوهش‌های مدیریت، ۱۴ شماره ۱۳، ۹۴، ۱۳، صفحه ۱۳-۲۶، ۱۳۹۱.
- [18] Tiacci, L., Event and object oriented simulation to fast evaluate operational objectives of mixed model assembly lines problems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012. 24(0): p. 35-48.
- [19] Banu Sungur, Yasemin Yavuz, Assembly line balancing with hierarchical worker assignment, 2014. 9(0).
- [20] Mayron César O. Moreira, Cristóbal Miralles, Alysson M. Costa, Model and heuristics for the Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem, *Computers & Operations Research*, 2015. 10(0): p.64-73.
- [۲۱] Reza.Ramezani, Abdullah.Ezzatpanah, Modeling and solving multi-objective mixed-model assembly line balancing and worker assignment problem. *Computers & Industrial Engineering*, 2015. 14: p. 233-244
- [22] Ibrahim Kucukkoc, David Z. Zhang, Balancing of parallel U-shaped assembly lines. *Computers & Operations Research*, 2015. 64:p.233-244.
- [23] Kadir Buyu kozkana, IbrahimKucukkocb, SuleItir Satoglua, David Z. Zhang, Lexicographic bottle neck mixed-model assembly line balancing problem: Artificial bee colony and tabu search approaches with optimized parameters. *Expert Systems with Applications*, 2016. 16:p.151-166.
- Journal of Production Economics, 1997. 51(3): p. 177-190.
- [4] JrJung Lyu, A Single-Run Optimization Algorithm for Stochastic Assembly Line Balancing Problems. *Journal of Manufacturing Systems*, 1997. 16(3): p.203-210.
- [۵] خدابنده، مهدی؛ حجازی، سیدرضا؛ راستی برزکی، مرتضی. "یک الگوریتم ژنتیک برای مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع با در نظر گرفتن مسیریابی در زنجیره تأمین". نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، شماره دوم، ۱۴(۳)، صفحه ۱۸۱-۱۶۷، ۱۳۹۲.
- [6] M.T. Sze, P. Ji and, W.B. Lee, Modeling the component assignment problem in PCB assembly. *Assembly Automation*, 2001. 21(1): p.55-60.
- [7] H. Pierreval, C. Caux, J.L. Paris, F. Viguier, Evolutionary approaches to the design and organization of manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2003. 44 :p.339-364.
- [8] Fan, W., et al., Balancing and simulating of assembly line with overlapped and stopped operation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2010. 18(8): p. 1069-1079.
- [9] Shwetank Avikal, Rajeev Jain, P.K. Mishra, H.C. Yadav, A heuristic approach for U-shaped assembly line balancing to improve labor productivity. *Computers & Industrial Engineering*, 2013. 64(4) :p.891-901.
- [۱۰] ملایی، نجمه. "بهینه‌سازی خط مونتاژ با رویکرد فراابتکاری چند هدفه". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما دکتر مقصود امیری، دانشگاه علامه طباطبائی، رشته مدیریت صنعتی، ۱۳۹۱.
- [11] T.A. Spedding, W.L. Lee, R. de Souza and S.S.G. Lee, Adaptive simulation of a keyboard assembly cell. *Integrated Manufacturing Systems*, 1997. 8(1):p.50-58.
- [12] Sameh M. Saad, Mike D. Byrne, Comprehensive simulation analysis of a flexible hybrid assembly system. *Integrated Manufacturing Systems*, 1998. 9(3): p.156-167.
- [13] S. Rajakumar, V.P. Arunachalam, V. Selladurai, Simulation of workflow balancing in assembly shopfloor operations. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2005. 16(3): p.265-281.
- [14] Mendes, A.R., et al., Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC camera assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 2005. 49(3): p. 413-431.
- [15] Wang, J., et al., Data driven production modeling and simulation of complex automobile general assembly plant. *Computers in Industry*, 2011. 62(7): p. 765-775.