

## توسعه مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی سیستم کانبان تعمیم‌یافته با سیاست تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها

عرفان حسن‌نایبی<sup>۱\*</sup>، نسیم نهاوندی<sup>۲</sup>، آرمان ساجدی‌نژاد<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۱۳	سیستم‌های کانبان یکی از راهکارهای موثر کنترل موجودی در سیستم‌های تولید به‌هنگام هستند. ارزیابی سیستم کانبان که بر اساس مکانیزم کنترل جریان مواد تعریف شده و مقدار و زمان مناسب تولید محصولات را کنترل می‌کند، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این مقاله، روشی جدید برای تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها در هر مرحله با توجه به مقدار تقاضای پس‌افت در ایستگاه آخر ارائه شده است. از جمله مزایای روش پیشنهادی، سادگی تنظیم پارامترهای روش است. برای تعیین تعداد کانبان‌ها و ارزیابی روش پیشنهادی در سیستم کانبان تعمیم‌یافته، یک مدل شبیه‌سازی ارائه شده است. تاثیر تغییر پویای تعداد کانبان‌ها، روی شاخص‌های متوسط میزان تولید، متوسط موجودی نیم‌ساخته، متوسط زمان تولید یک محصول و نرخ بهره‌وری ماشین‌آلات بررسی شده است. از مدل شبیه‌سازی جهت بررسی تخصیص غیریکسان کانبان‌ها به مراحل مختلف تولید نیز استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بکارگیری سیاست پیشنهادی تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها در سیستم کانبان تعمیم‌یافته و تعیین مناسب پارامترها در طول فرآیند تولید می‌تواند افزایش نرخ تولید و کاهش تقاضای پس‌افت را در مقایسه با روش‌های موجود به همراه داشته باشد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۵	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
سیستم کانبان تعمیم‌یافته، تولید کششی، کانبان متغیر، شبیه‌سازی.	

### ۱- مقدمه

مواد اولیه است. سیستم کانبان بر اساس مکانیزم کنترل جریان مواد تعریف شده است و این سیستم، مقدار و زمان مناسب تولید محصولات را کنترل می‌کند. یکی از راه‌های کنترل و مدیریت موجودی در خطوط تولید به‌هنگام، استفاده از سیستم کانبان است. این سیستم مانند شبکه عصبی برای سیستم تولیدی عمل کرده و جریان مواد و اطلاعات و اینکه چه میزان و از چه نوع تولید شود را مدیریت می‌کند. مکانیزم کنترل کششی تولید، روشی است که وظیفه هماهنگی آزادشدن و ورود قطعات به هر مرحله از تولید را بر عهده دارد [۳]. در سیستم‌های تولید به‌هنگام، موجودی نیمه‌ساخته قطعات و همچنین موجودی محصول نهایی در هر مرحله تولیدی وجود دارد. این فعالیت‌ها توسط کانبان‌های تولید - سفارش، کنترل و مدیریت می‌شود. تعیین تعداد کانبان‌ها برای هر قطعه، به عنوان یک تصمیم مدیریتی مهم که به طور مستقیم شاخص‌های سیستم را

سیستم‌های تولید کششی به طور گسترده‌ای در شرایط واقعی مورد استفاده و در مقالات متعددی نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. جریان مواد و جریان اطلاعاتی سفارش‌ها و تقاضا در سیستم‌های تولید کششی با سیستم‌های تولید فشاری متفاوت است. هم‌اکنون سیستم‌های مختلفی نیز وجود دارند که از هر دو منطق کششی و فشاری در تولید استفاده می‌کنند. در این بین، سیستم‌های مبتنی بر کارت، مکانیزمی برای آزادسازی و مدیریت جریان مواد را در سیستم‌های تولید کششی ارائه می‌کنند [۱]. یکی از راهکارهای کنترل موجودی در سیستم‌های تولید به‌هنگام، پیاده‌سازی سیستم‌های کانبان در تولید می‌باشد [۲]. سیستم کانبان به عنوان یکی از زیرسیستم‌های تولیدی تویوتا مطرح شده و هدف کلی و ایده آن در کنترل سطوح موجودی، تولید و تامین اجزا و قطعات و در برخی موارد

۲. دانشیار، مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس  
۳. استادیار، پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: e.hassannayebi@modares.ac.ir  
۱. دانشجوی دکتری، مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس

استفاده قرار می‌گیرد. مروری بر مقالات ارائه شده در حوزه سیستم‌های کانبان با تمرکز روی سیستم‌های بهبودیافته کانبان اولیه در [۷] ارائه شده است. با توجه به اینکه شرایط تولیدی و بازار برای تمامی شرکت‌ها یکسان نیست، در نتیجه سیستم کانبان دارای محدودیت‌هایی است که در پیشینه تحقیق به آنها اشاره شده است [۸ و ۹]. نتایج تحقیق مروری نشان می‌دهد، تفاوت و خلاء زیادی بین تحقیقات تئوری و کاربردی وجود دارد. یک دسته‌بندی از سیستم‌های کششی مبتنی بر کارت در مقاله‌ای از گنزالس آر و همکاران [۱۱] انجام شده است.

در مقاله [۱۰]، یک روش برای تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها در یک محیط تولید در شرایط ناپایدار ارائه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. روش پیشنهادی با ارائه سه مثال در چارچوب یک مدل شبیه‌سازی پیاده‌سازی شده است. در تحقیق [۷] نیز بیش از ۳۰ نوع سیستم مختلف کانبان بررسی و بر اساس میزان مشابهت آن با مدل اولیه کانبان، تفاوت عملیاتی بین سیستم‌ها، مزایا و نقاط ضعف سیستم جدید در مقایسه با مدل اولیه کانبان، دسته‌بندی شده‌اند. در اکثر تحقیقاتی که سیستم کانبان را توسعه داده‌اند، منطق اولیه این سیستم را حفظ کرده و تغییرات جزئی در ساختار سیستم کانبان اولیه داشته‌اند [۷]. اکثر تحقیقات نیز به توسعه تئوریک سیستم کانبان پرداخته‌اند که نشان‌دهنده این موضوع است که توسعه و کاربردی نمودن مدل‌های کانبان موجود، در عمل با دشواری همراه بوده است [۱۱].

معیارهای مختلفی برای مقایسه سیستم‌های جدید کانبان در مقایسه با سیستم‌های رایج کانبان ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به افزایش سطح پیچیدگی از نظر پیاده‌سازی، افزایش حمل و نقل در کارخانه، تأخیر در انتقال اطلاعات تقاضا به مراحل اولیه (ضعف در پاسخ‌دهی به سیستم) و افزایش متوسط سطح موجودی اشاره نمود. سیستم کانبان در شرایط تصادفی بودن تقاضا و زمان‌های پردازش، عملیات غیراستاندارد، زمان‌های آماده‌سازی بالا، تنوع در محصولات و وجود عدم قطعیت در تامین مواد اولیه، با چالش‌هایی مواجه می‌شود. مشتریان به دنبال تحویل به موقع، تنوع، هزینه پایین و کیفیت بالا هستند. به دلیل دشواری در استفاده از سیستم کانبان در ساختار اولیه و اصلی آن در چنین شرایط پیچیده و متغیری، مدل اولیه کانبان در جهات مختلفی توسعه و مطابق با شرایط

تحت تاثیر قرار می‌دهد، مطرح می‌شود. این تصمیم روی کاهش میزان تقاضای پس‌افت در هر ایستگاه نقش کلیدی دارد.

سیستم کانبان یک ابزار کنترلی برای اجرای موفق سیستم کششی (تحويل به موقع) است. اگر در ایستگاهی بیش از حد نیاز کانبان در نظر گرفته شود، این امر ممکن است منجر به ازدحام موجودی در آن ایستگاه شود. همچنین تعداد کمتر از حد نیاز کانبان نیز می‌تواند تأخیر در سفارشات را منجر شود. تعیین مناسب تعداد کانبان‌ها در خط تولید می‌تواند میانگین زمان توقفات خط تولید و میزان موجودی نیمه‌ساخته را به حداقل برساند. تعیین تعداد کانبان‌ها با رویکردهای مختلفی مانند برنامه‌ریزی ریاضی قابل حصول است. هدف تحقیق حاضر، شامل توسعه یک مدل شبیه‌سازی برای تحلیل سیستم کانبان تعمیم‌یافته و همچنین ارزیابی رویکرد تنظیم تعداد کانبان‌ها برای بهبود شاخص‌های تعریف شده است. در این تحقیق همچنین به کمک ابزار شبیه‌سازی، تأثیرات پارامترهای احتمالی (از جمله نرخ ورود تقاضا) روی شاخص‌های ارزیابی سیستم (از جمله متوسط زمان تولید و تقاضای پس‌افت) و نحوه تعیین تعداد کانبان‌ها بررسی خواهد شد. از جمله سایر اهداف این تحقیق می‌توان به مطالعه نحوه توزیع تعداد کانبان‌ها روی شاخص نرخ تولیدی خط و حجم موجودی نیمه‌ساخته قطعات، تاثیر تخصیص غیریکنواخت کانبان‌ها به مراحل مختلف تولیدی و مطالعه رویکرد تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها روی شاخص‌های ارزیابی سیستم اشاره کرد.

## ۲- مطالعه پیشینه تحقیق

سیستم‌های تولید به‌هنگام، به موجودی پایه ورودی در قالب مواد خام و موجودی نهایی در فرم محصولات در هر مرحله از تولید نیازمند هستند [۴-۶]. در این سیستم‌ها، دو نوع کانبان شامل کانبان تولید - سفارش و کانبان حمل مورد استفاده قرار می‌گیرد تا مقدار تولید و حمل در هر مرحله کنترل شود [۴]. اگرچه مقالات متعددی موضوع تولید در محیط تولید به‌هنگام را بررسی کرده‌اند، اما بیشتر مقالات تنها یک موجودی بین مراحل متوالی و به عبارتی یک نوع کانبان را در نظر گرفته‌اند. مشابه سایر سیستم‌های کنترل تولید، کانبان نیز برای برآورده کردن نیازهای خاص یک شرکت (به عنوان مثال، جهت عملکرد موثر سیستم تحت شرایط خاص تولیدی و بازار) توسعه داده شده و مورد

سازمان‌ها تطبیق داده شده است [۷].

انعطاف‌پذیری در تعیین سطح موجودی مجاز در مراحل مختلف تولیدی، یک معیار مهم تصمیم‌گیری برای موفقیت این سیستم‌ها در شرایط وجود نوسانات تقاضا و تغییرات زمان‌های پردازش است. سیستم کانبان انعطاف‌پذیر (FKS<sup>۱</sup>) از یک الگوریتم برای تعیین پویا و سیستماتیک تعداد کانبان‌ها در جهت کاهش زمان‌های بلوکه شدن و بیکاری به دلیل وجود عدم قطعیت (تقاضا و زمان پردازش) در یک سیکل تولیدی استفاده می‌کند [۱۱]. این سیستم جهت رفع نواقص سیستم اولیه کانبان توسعه داده شده است. ایده اصلی این است که جریان تولید با کاهش زمان‌های بلوکه شدن و بیکاری ماشین‌ها که به دلیل تغییرات زمان‌های پردازش روی می‌دهد، کاهش یابد. این امر با افزایش تعداد کانبان‌ها بدست می‌آید. در سیستم کانبان انعطاف‌پذیر، یک حداقل کانبان پایه در هر مرحله تعریف می‌شود و تغییرات (افزایش یا کاهش) در تعداد کانبان‌ها به نحوی است که تعداد کانبان‌ها از این حداقل تعداد کانبان پایین‌تر نشود. نتایج حاصل از پیاده‌سازی سیستم کانبان انعطاف‌پذیر، نشان داده است که حتی در شرایط وجود واریانس بالا در زمان‌های پردازش، این سیستم عملکرد بهتری در مقایسه با سیستم کانبان پایه دارد [۱۱].

یک مسئله مهم در طراحی سیستم‌های تولیدی مبتنی بر کانبان، تعداد اندازه کانبان‌ها در مراحل مختلف تولیدی است. رویکردهای مختلفی برای تعیین تعداد کانبان شامل روش‌های دقیق، روش شبیه‌سازی و روش‌های ابتکاری مطرح شده است. هر دسته روش دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود می‌باشد. در تحقیق [۱۲] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای تعیین سیاست بهینه تعداد کانبان در هر ایستگاه با هدف ایجاد تعادل بین هزینه و سطح سرویس توسعه شده است.

در مقاله [۱۳] یک رویکرد کنترل بهینه گسسته - زمان برای یک سیستم تولید - توزیع چند مرحله‌ای تولید به‌هنگام با هدف حداقل‌سازی متوسط کل هزینه در واحد زمان ارائه شده است به طوری که تقاضا و ظرفیت به صورت متغیرهای احتمالی در آن در نظر گرفته‌اند. این مسئله کنترل بهینه به صورت یک فرآیند زنجیره مارکف مدل سازی شده و با نتایج بهینه سیستم‌های کششی در یک

سیستم تولید - توزیع مبتنی بر تولید به‌هنگام (از جمله کانبان پایه، سیستم موجودی پایه، سیستم موجودی ثابت و سیستم ترکیبی و توسعه یافته کانبان) مقایسه شده است. در تحقیق [۱۴] به محاسبه تعداد بهینه کانبان‌ها در سیستم کانبان عمومی (GKCS<sup>۲</sup>) با سه الگوی تقاضای مختلف و با فرض ثابت ماندن متوسط زمان پردازش پرداخته شده است. مطالعه روی یک خط تولید با سه مرحله با در نظر گرفتن احتمال خرابی ماشین‌ها انجام شده است. سیستم کانبان عمومی به کمک یک نرم‌افزار شبیه‌سازی به منظور تعیین تعداد بهینه کانبان‌ها مدل‌سازی شده است. اهداف اصلی در تعیین تعداد بهینه کانبان‌ها شامل بیشینه کردن خروجی خط تولید، کمینه کردن موجودی در جریان ساخت و بالابردن نرخ بهره‌وری ماشین‌آلات بوده است. در نهایت، نتایج بدست آمده از مدل شبیه‌سازی با خصوصیات و ویژگی‌های مدل کانبان عمومی با یکدیگر تطبیق داده شده است. در برخی از مطالعات، مسئله توزیع کارت‌های سیستم کانبان و مطالعه تاثیر آن روی شاخص‌های عملکردی سیستم مانند موجودی نیمه‌ساخته و نرخ تولید مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. در دیگر مطالعات، تعیین پارامترهای طراحی سیستم کانبان تعمیم‌یافته به کمک مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶]. مدل‌های تحلیلی با استفاده از شبکه صف برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های کانبان تعمیم‌یافته بکار گرفته شده‌اند [۱۷]. در پیشینه تحقیق، ساختارهای یکپارچه‌ای برای کنترل یک سیستم تولیدی چندمرحله‌ای کششی ارائه شده و سیستم‌های کنترل موجودی پایه، سیستم کانبان، سیستم کانبان توسعه‌یافته و سیستم کانبان عمومی با یکدیگر مقایسه شده‌اند [۳].

روش‌های جستجوی فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و جستجوی ممنوعه برای یافتن تعداد بهینه کانبان‌ها با هدف کمینه کردن هزینه‌ها در یک سیستم JIT توسعه داده شده‌اند [۱۸].

در تحقیق [۱۹] یک روش برای تعیین تعداد کانبان‌ها در یک سیستم تولیدی کششی به کمک مدل شبیه‌سازی ارائه شده و رابطه بین تعداد کانبان‌ها و متوسط زمان لازم برای برآورده کردن تقاضای یک مشتری بدست آمده است. از این رابطه در مدل برای تعیین تعداد کانبان‌ها با هدف

<sup>2</sup> Generalized Kanban Control System

<sup>1</sup> Flexible kanban System

مرحله‌ای معرفی شده است. این مکانیزم کنترلی بستگی به دو پارامتر دارد که در هر مرحله شامل تعداد کانبان و سطح موجودی پایه قطعات است. در مقاله [۳۱] به مقایسه عملکرد تکنیک‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی تعداد کانبان پرداخته شده است. برای این منظور یک مدل شبیه‌سازی برای پیدا کردن تعداد بهینه کانبان با هدف به حداقل رساندن هزینه توسعه یافته است. سه روش جستجو مبتنی بر شبیه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک، روش شبیه‌سازی تبرید و جستجوی ممنوعه توسعه یافته و بهترین نتایج دست یافته توسط هر الگوریتم در مدت زمان محدود با یکدیگر مقایسه شده است. در تحقیق [۳۲] بهینه‌سازی یک سیستم کانبان پویا با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید انجام شده است. به منظور برآورد شاخص‌هایی مانند تغییرات تقاضا و واریانس زمان پردازش یک مدل شبیه‌سازی نیز توسعه یافته است. مدل شبیه‌سازی شی‌گرا برای سیستم کارت کانبان دو طرفی پویا برای مدل‌سازی انواع الگوهای تقاضا توسعه داده شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. توابع هدف مدل بهینه‌سازی نیز میانگین میزان تولید و متوسط صف کانبان در نظر گرفته شده است. در پژوهشی از [۳۳] از تکنیک بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک) مبتنی بر شبیه‌سازی برای ارزیابی سیاست‌های کنترلی خط تولید کششی در سیستم‌های تولید و مونتاژ استفاده شده است. در این مقاله ترکیبی از سیستم موجودی پایه و کانبان و سیاست‌های کنترل تولید در سیستم‌های مونتاژ برای تولید محصولات نهایی پیشنهاد شده است. از تکنیک شبیه‌سازی رویداد گسسته به منظور ارزیابی عملکرد خطوط مونتاژ و از ماژول بهینه‌سازی برای تعیین بهترین پارامترهای کنترلی برای سیاست‌های مربوط به مدیریت موجودی‌های نیمه‌ساخته استفاده شده است. در تحقیق [۳۱] سه الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به کمک روش‌های الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و جستجوی ممنوعه برای یافتن پارامترهای تصمیم در سیستم‌های کانبان ارائه و مقایسه شده است. رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به کمک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای یافتن پارامترهای بهینه سیستم کانبان نیز به کار گرفته شده است [۳۲]. در مقالات جدیدتر، از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک برای تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم در سیستم‌های تولید کششی مانند سیستم

کمینه‌سازی هزینه، استفاده شده است. در تحقیق [۲۰] یک سیستم تولید به‌هنگام با در نظر گرفتن کانبان تولید و تامین‌کننده با تقاضای احتمالی مطالعه شده است. برای مسئله فوق، یک الگوریتم برای تعیین بهینه تعداد کانبان‌ها از هر نوع با هدف کمینه کردن متوسط هزینه در هر دوره ارائه شده است. سیاست‌های مختلف کنترلی در سیستم تولید به‌هنگام با اهدافی نظیر کاهش زمان تحویل، سطح موجودی و از طرفی افزایش سرعت پاسخگویی به تقاضای مشتری و بالابردن کیفیت مورد ارزیابی قرار گرفته است [۲۱].

در تحقیق [۲۲] یک رویکرد کلی به کمک کارت‌های مجوز تولید ارائه شده است که شامل مکانیزم‌های کنترلی رایج مانند کانبان، موجودی پایه و موجودی ثابت با انتخاب پارامترهای مناسب می‌باشد. همچنین مقایسات کمی و کیفی روی سیستم‌های کانبان، موجودی پایه و سیستم کانبان تعمیم‌یافته انجام شده است [۲۳]. در تحقیق [۲۴] روشی توسعه داده شده است که بتواند مسائل سیستم‌های تولیدی با سه مرحله را حل کند. سپس مقایسه‌ای از جواب‌های تقریبی روش پیشنهادی با جواب‌های بهینه در سیستم‌هایی مانند کانبان، موجودی پایه، موجودی ثابت و سیستم‌های ترکیبی انجام شده است.

با توجه به پیچیدگی‌های سیستم‌های کانبان و وجود شرایط پویا و احتمالی در آن، رویکردهای بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی از دامنه کاربرد مناسبی در این حوزه برخوردار هستند. در تحقیق [۲۵] یک رویکرد بهینه‌سازی تکاملی در تعیین بهینه پارامترهای سیستم‌های کانبان، موجودی ثابت و سیستم‌های ترکیبی، ارائه شده است. یک دسته‌بندی کلی از تحقیقات مرتبط به مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم‌های کانبان در جدول ۱ خلاصه شده است.

در تحقیق [۲۹] یک مدل ریاضی برای تعیین تعداد کانبان و اندازه دسته تولید در یک سیستم زنجیره تامین چند مرحله‌ای مبتنی بر JIT ارائه شده است. مدل پیشنهادی تحت تقاضا تصادفی قادر به تعیین اندازه دسته تولید و حمل و نقل در سیستم کانبان زنجیره‌ای است. یک الگوریتم برای محاسبه تعداد بهینه کانبان‌ها و اندازه دسته با هدف به حداقل رساندن هزینه کل زنجیره توسعه داده شده است. در تحقیق [۳۰] ترکیب سیستم کانبان تعمیم‌یافته و موجودی پایه مورد مطالعه قرار گرفته است. در مقاله فوق، یک مکانیزم جدید برای هماهنگی سیستم‌های تولید چند

سیستم کانبان، مدیریت شود. در تحقیق [۳۷] یک روش شبیه‌سازی برای ارزیابی سناریوهای تغذیه خطوط در یک سیستم کانبان ارائه شده است. در مقاله مذکور، سیاست‌هایی مختلف تغذیه خط در یک مطالعه موردی از صنعت خودرو سازی از لحاظ معیارهای هزینه حمل و نقل مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در مطالعه‌ای از [۳۴] مدلی مبتنی بر برنامه‌نویسی الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی به منظور تعیین پویای تعداد کارت‌ها در سیستم کشتی واکنشی توسعه داده شده است. به کمک این رویکرد و با توجه به منطق یادگیری الگوریتم، نحوه تغییر تعداد کانبان‌ها از طریق استخراج دانش به کمک یک مدل درخت تصمیم‌گیری انجام می‌شود.

تنظیم پویای تعداد کارت‌ها در سیستم موجودی ثابت، در تعداد محدودی از مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق [۳۸] یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای سیستم‌های موجودی ثابت ارائه شده است. به منظور پیاده‌سازی رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای تنظیم این پارامترها در طراحی سیستم کشتی واکنش پذیر از ماژول بهینه‌سازی OPTQUEST در نرم‌افزار ARENA استفاده شده است. آزمایش‌های شبیه‌سازی نشان داده است که دفعات تغییر در تعداد کارت‌های کانبان یک مسئله تعیین‌کننده است.

موجودی پایه، کانبان، سیستم موجودی ثابت و سیستم کانبان توسعه یافته استفاده شده است [۳۳].

در مطالعه [۳۵] یک سیستم کنترل فازی برای تنظیم تعداد کارت‌های کانبان در یک سیستم تولید مبتنی بر سطح موجودی ثابت ارائه شده است. ورودی‌های کنترل کننده فازی بر اساس مشاهده نوسانات تقاضا و میزان توان سیستم تولیدی است. برای اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی، یک مدل شبیه‌سازی گسسته - پیشامد در محیط نرم افزار ARENA توسعه یافته است. از مزایای این روش فازی می‌توان به مدل سازی عدم قطعیت در زمان‌های پردازش و تقاضا و همچنین قابلیت تحلیل قابلیت اطمینان سیستم تولیدی اشاره کرد.

ترکیب تکنیک‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به طور خاص به عنوان ابزاری برای حل مسایل مربوط به برنامه‌ریزی و کنترل خطوط تولید مورد توجه محققین بوده‌اند. در تحقیق [۳۶] یک رویکرد یکپارچه از روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیستم‌های کنترل کشتی توسعه داده شده است. به منظور انتخاب کارآمدترین سیاست از میان سیاست‌های کنترلی و نیز تنظیم معیارهای کلیدی (از جمله به حداکثر رساندن بهره‌وری خط تولید) از یک مدل بهینه‌سازی و یک شبیه‌ساز رویداد - گسسته استفاده شده است.

مطابق با فلسفه تولید ناب، تنظیم جریان مواد بین خطوط و انبارها برای یک خط تولید می‌تواند با استفاده از یک

جدول ۱: دسته‌بندی مقالات مرتبط با روش‌های بهینه‌سازی و مدل‌سازی سیستم‌های کانبان

تحقیق	سیستم‌های مورد بررسی در تحقیق	رویکرد حل یا مدل‌سازی مسئله
[۱۹]	کانبان پایه	متا - مدل مبتنی بر شبیه‌سازی
[۲۶]	کانبان پایه	شبیه‌سازی
[۲۷]	کانبان پایه و موجودی ثابت	شبیه‌سازی
[۲۸]	کانبان پایه	الگوریتم ژنتیک
[۱۷]	کانبان تعمیم‌یافته	تئوری شبکه صف
[۲۹]	کانبان چند مرحله‌ای	روش‌های دقیق
[۳۰]	کانبان تعمیم‌یافته و کانبان توسعه‌یافته	روش شبیه‌سازی و روش تحلیلی
[۲۵]	کانبان پایه، موجودی ثابت و ترکیبی	رویکرد بهینه‌سازی تکاملی
[۳۱]	کانبان پایه	بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی الگوریتم‌های GA، TS و SA
[۳۲]	کانبان پایه	بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی الگوریتم SA
[۳۳]	موجودی پایه، کانبان پایه، موجودی ثابت و کانبان توسعه‌یافته	بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی الگوریتم GA
[۳۴]	تولید کشتی	الگوریتم GA

مشتری، یک محصول را تحویل می‌گیرد یا یک محصول نهایی تولید می‌شود، ورود یک قطعه جدید در صورت وجود کارت کانبان کافی، به هر ایستگاه انجام می‌شود. بدین ترتیب، سیستم موجودی پایه که به کمک کارت، سطح موجودی را کنترل می‌کند، سطح موجودی نیمه‌ساخته در هر ایستگاه را محدود کرده و مشکل نامحدود بودن ظرفیت در سیستم اولیه موجودی پایه، مرتفع می‌شود [۴۱]. ایده اولیه از سیستم تنظیم پویای کانبان نیز در تحقیق [۴۲] معرفی شده است که بصورت پویا، تعداد سیگنال‌ها و سطح موجودی را تنظیم می‌کند. تغییر تعداد سیگنال‌ها در یک سیستم تولیدی، یک فاکتور کلیدی تصمیم‌گیری در شرایط وجود تغییرات ناپایدار در تقاضا می‌باشد. ریس و همکاران [۴۲] معادلاتی برای محاسبه تعداد سیگنال‌ها ارائه کرده‌اند. با توضیحات ارائه شده، می‌توان سیستم کانبان تعمیم‌یافته را تعریف نمود. این سیستم کانبان به صورت تئوری در مقالاتی از [۴۳، ۴۴] توسعه داده شده است. این سیستم شامل استفاده از بافرها برای برآورده سازی تقاضا و استفاده از سیگنال‌ها برای اجازه تولید و همچنین محدود کردن سطح موجودی نیمه‌ساخته می‌باشد. از دشواری‌های این سیستم می‌توان به نیاز به تعریف و مدیریت دو پارامتر کنترلی در هر مرحله تولیدی شامل بافر و تعداد سیگنال‌های تولید اشاره نمود. تفاوت اصلی در سیستم تعمیم‌یافته در مقایسه با سیستم اولیه کانبان این است که در این سیستم، تقاضاها به طور مستقلی از سیگنال‌ها فعالیت می‌کنند و حتی در حالتی که هیچ قطعه‌ای در موجودی یک ایستگاه کاری وجود ندارد، اگر سیگنال موجود باشد، سیگنال سفارش به مرحله پیش نیاز فرستاده می‌شود. سیستم کانبان تعمیم‌یافته با ترکیب اصول و منطق سیستم‌های کانبان و سیستم موجودی پایه عمل می‌کند. قواعد آن مشابه سیستم کانبان توسعه یافته است. پارامترهای تصمیم در مدل کانبان تعمیم‌یافته شامل تعداد کارت‌های کانبان برای کنترل موجودی نیمه‌ساخته در مراحل مختلف و سطح موجودی پایه یا نقطه سفارش در بافر خروجی ایستگاه‌ها می‌باشد.

سیستم کانبان تعمیم‌یافته، یک سیستم تولید کشتی با ترکیب سیستم موجودی پایه و سیستم کانبان است. در این سیستم مرحله  $iam$  شامل  $K_i$  کانبان برای اجازه تولید در

هدف تحقیق حاضر، ارائه روشی جدید برای تنظیم پویای تعداد کانبان‌های مراحل تولید با توجه به سطح تقاضای پس‌افت در جهت بهبود عملکرد سیستم کانبان تعمیم‌یافته است به طوری که کل سطح موجودی مجاز خط تولید، ثابت بماند. برای ارزیابی روش پیشنهادی از مدل‌های شبیه‌سازی گسسته - پیشامد استفاده شده است.

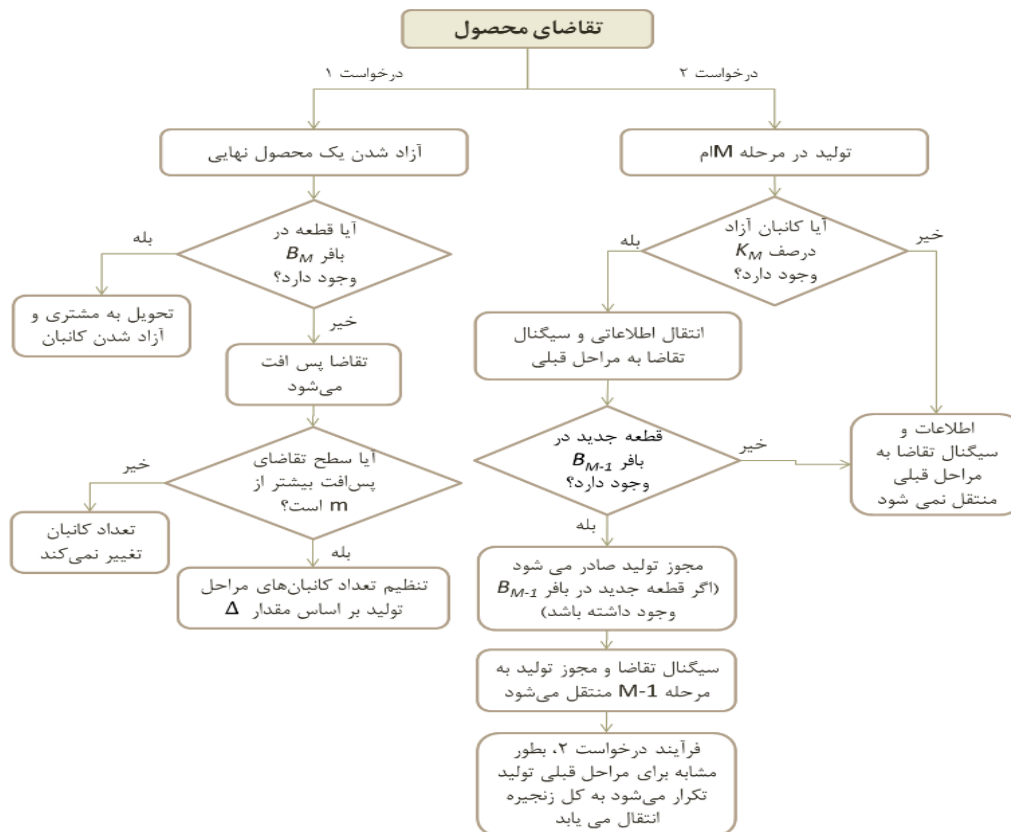
### ۳- معرفی سیستم کانبان مورد بررسی در تحقیق

در این بخش به صورت اجمالی به معرفی سیستم‌های کانبان مورد مطالعه و مرتبط با موضوع تحقیق پرداخته می‌شود. سیستم موجودی پایه ( $BSS^1$ ) در شرایط رقابتی و وجود نوسانات تقاضا پیشنهاد شده است [۳۹]. در این سیستم، سطح موجودی به طور مداوم برای شناسایی تغییرات در روند تقاضا بررسی می‌شود. در این سیستم هرگاه ناپایداری شناسایی شود، تعداد سیگنال‌ها کاهش یا افزایش می‌یابد که متفاوت با سیستم‌های رایج کانبان عمل می‌کند. سیستم‌های برپایه موجودی، در دسته سیستم‌های کانبان هستند که مسئله تغییر تعداد سیگنال‌ها را مدنظر قرار داده‌اند. سیستم موجودی پایه برای کنترل سطح موجودی در سیستم‌های تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۰]. ویژگی اصلی این سیستم شامل نگهداری حداقل موجودی (موجودی پایه) در هر ایستگاه است. هرگاه یک تقاضا برای محصول نهایی وجود داشته باشد، یک سیگنال به هر یک از ایستگاه‌های قبلی فرستاده می‌شود و یک کارت از هر کدام آزاد می‌شود. برای هر یک از ایستگاه‌ها، این سیگنال اجازه ورود قطعات و مواد جدید را داده و سطح موجودی در هر ایستگاه همواره کمتر از مقدار موجودی پایه خواهد بود. مزیت اصلی این سیستم در پاسخ لحظه‌ای و سریع کل سیستم به تقاضای مشتری است. معایب روش نیز در این است که محدودیتی برای تعداد کل قطعات و یا سطح موجودی نیمه‌ساخته کل در نظر گرفته نشده است که به کمک سیستم کانبان می‌توان، محدودیت فوق را برقرار کرد. متغیر تصمیم سیستم موجودی پایه، شامل تعداد کارت‌ها در هر مرحله یا ایستگاه می‌باشد. در سیستم موجودی پایه مبتنی بر کارت، از این ایده استفاده می‌شود که اطلاعات تقاضای مشتری بلافاصله به ایستگاه‌های قبلی منتقل شود. در نتیجه به محض اینکه

<sup>1</sup> Base Stock System

می‌رسد، اگر کانبان مرحله دوم در  $K_2$  موجود باشد، اطلاعات تقاضا به طور مستقیم به مرحله قبلی  $D_1$  فرستاده می‌شود. کانبان مرحله دوم به صف  $DK_2$  منتقل شده و اجازه تولید در مرحله دوم را صادر می‌کند. اگر قطعه جدیدی در  $B_1$  موجود باشد، بلافاصله با کانبان مرحله دوم در  $DK_2$  ادغام شده و هر جفت آنها (قطعه و کانبان) به  $MP_2$  آزاد می‌شوند. در غیر این صورت، کانبان باید در صف  $DK_2$  برای رسیدن قطعه تکمیل شده و رسیدن آن به  $B_2$  منتظر بماند. اگر کانبان مرحله دوم در  $K_2$  موجود نباشد، تقاضا باید منتظر کانبان مرحله دوم بماند. این اطلاعات تقاضا برای رسیدن به مرحله قبلی متوقف می‌شود. به محض اینکه یکی از  $B_{i-1}$  یا  $K_i$  اطلاعات را دریافت کنند، سیکل مجدداً تکرار می‌شود. در سیستم تعمیم‌یافته ایستگاه  $i$ ام هنگامی تولید را انجام می‌دهد که سطح موجودی نیمه‌ساخته در ایستگاه  $i$ ام از اندازه معینی  $NC(i)$  کمتر باشد (یا کارت کانبان به اندازه کافی موجود باشد) و همچنین سطح موجودی در بافر خروجی ایستگاه  $i$ ام (مقدار  $OB(i)$ ) کمتر از نقطه سفارش یا  $S(i)$  شده باشد [۴۳ و ۴۴].

این مرحله می‌باشد. در ابتدا، تمامی کانبان‌ها در مرحله  $i$ ام در صف  $K_i$  ذخیره می‌شوند. بافر  $B_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) شامل  $s_i$  قطعه نهایی و با بافر مواد خام است. تقاضاهای تولیدی قطعات مرحله  $i$  در دو صف ذخیره می‌شوند. صف  $D_i$  که تنها شامل تقاضا است و صف  $DK_i$  که شامل کانبان‌های مرحله  $i$  است که با اطلاعات تقاضای از مرحله بعدی آزاد می‌شود. پارامترهای کنترلی در سیستم کانبان تعمیم‌یافته در هر مرحله شامل تعداد کانبان‌ها  $K_i$  و سطح موجودی پایه  $s_i$  است. سیستم کانبان تعمیم‌یافته بدین صورت عمل می‌کند که وقتی یک سفارش از مشتری به سیستم می‌رسد، این تقاضا بلافاصله به دو بخش تقاضا تقسیم می‌شود. تقاضای اول به صف  $D$  که درخواست آزاد کردن محصولات نهایی از  $B_2$  به مشتری را انجام می‌دهد، ملحق می‌شود. تقاضای دوم به صف  $D_2$  ملحق می‌شود که درخواست تولید در مرحله دوم را انجام می‌دهد. وقتی تقاضای اول به  $D$  می‌رسد، اگر قطعه‌ای در  $B_2$  موجود باشد، این قطعه برای مشتری ارسال می‌شود. در غیر این صورت تقاضا پس‌افت شده و منتظر رسیدن محصول نهایی به  $B_2$  می‌شود. هنگامی که تقاضای دوم به  $D_2$



شکل ۱: نمودار جریان اطلاعاتی در سیستم پیشنهادی

ایستگاه کاری، کارت‌های کانبان) را در مدل شبیه‌سازی طراحی کرده و از آن برای ساخت مدل خط تولید استفاده کند. این نرم افزار دارای زبان برنامه‌نویسی مختص به خود با نام 4Dscript می‌باشد که به کاربر در مدل‌سازی پیشرفته محدودیت‌های سیستم و کدنویسی، کمک می‌کند. برای هر یک از اجزای یک مدل شبیه‌سازی، یک اتم در نظر گرفته می‌شود. برای برقراری ارتباط بین اجزای مدل از کانال‌های ارتباطی و اطلاعاتی استفاده می‌شود. اتم‌ها در مدل شبیه‌سازی از طریق کانال‌های ارتباطی قادر به تبادل اطلاعات و ردیابی هستند. در نرم افزار ED سه دسته کانال ارتباطی شامل کانال‌های ورودی، خروجی و اطلاعاتی برای هر اتم قابل تعریف می‌باشد. کانال‌های ورودی و خروجی جهت انتقال و جریان اتم‌ها (مانند جریان محصولات روی ماشین‌آلات) و همچنین ارجاع کردن به سایر اتم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. کانال اطلاعاتی نیز برای انتقال داده‌ها و ارجاع کردن به سایر اتم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان حرکت قطعات و مسیریابی آنها در مدل خط تولید به کمک کانال‌های ورودی و خروجی اتم‌ها قابل تعریف است. همچنین امکان تعریف چندین کانال ورودی و خروجی برای هر اتم وجود داشته و یک کارگاه تولیدی نیز قابل مدل‌سازی است. از جمله مزیت بسیار خوب نرم افزار ED در امکان تعریف رویدادها و مدیریت رخداد آنها در هر اتم می‌باشد. لیست رویدادهای هر اتم، تعیین کننده رفتار اتم در شرایط مختلف (ورود به اتم دیگر، خروج از اتم، ورود به مدل و ...) است. یک رویداد می‌تواند برای اتم  $e_1$  به فاصله زمانی  $e_2$  ثانیه از لحظه اجرا و با کد رویداد  $e_3$  اجرا شود. در هنگام اجرا شدن دستورات بخش کنترل رویدادها، با توجه به مقدار متغیر کد رویداد، یکی از رویدادهای اتم اجرا می‌شود.

#### ۴-۱- نمایشی از مدل شبیه‌سازی

در شکل (۲) نمایشی کلی از مدل شبیه‌سازی ساخته شده ارائه شده است. این مدل شبیه‌سازی شامل قسمت‌های مختلفی از جمله بخش ورود تقاضای تصادفی، بخش خط تولید و مدیریت موجودی با سیستم کانبان تعمیم یافته و نیز جداول اطلاعات پایه ای شبیه‌سازی است که در ادامه به تفکیک تشریح می‌شود.

#### ۴-۲- اجزای مدل شبیه‌سازی

جهت برقراری ارتباط فیزیکی بین نهادهای مدل

#### ۳-۱- جریان اطلاعاتی و مواد در سیستم پیشنهادی

روش پیشنهادی در این تحقیق برای تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها در هر مرحله با توجه به مقدار تقاضای پس‌افت مشتری می‌باشد. بدین ترتیب که اگر مقدار تقاضای پس‌افت از مقدار از قبل تعیین شده‌ای مانند  $m$  بیشتر شود، آنگاه تعداد کانبان‌های مراحل آخر به اندازه  $\Delta$  افزایش یابد و مجدداً با پایین آمدن سطح موجودی پس‌افت از مقدار  $m$ ، تغییر تعداد کانبان‌ها صورت گیرد.

نمودار جریان اطلاعاتی برای تشریح نحوه عملکرد سیستم پیشنهادی در شکل (۱) رسم شده است. فرآیند تولید به صورت کششی و با سیگنال تقاضای مشتری آغاز می‌شود. تقاضای مشتری در قالب دو درخواست به مرحله آخر تولید می‌رسد. درخواست اول جهت برآورده کردن نیاز مشتری و درخواست دوم جهت آزاد شدن کارت‌های کانبان و ارسال سیگنال تقاضای مشتری به مراحل قبلی تولید استفاده شده است. در صورتی که محصول نهایی موجود نباشد، تقاضای مشتری به صورت پس‌افت خواهد شد. هرگاه تقاضا پس‌افت شود، بررسی می‌شود که آیا مقدار تقاضای پس‌افت از  $m$  بزرگ‌تر شده است یا خیر. اگر چنین حالتی رخ داده باشد، تنظیم تعداد کانبان‌ها در مراحل تولید انجام می‌شود. این تنظیم شامل افزایش تعداد کانبان‌های مراحل آخر به میزان  $\Delta$  و به همان میزان کاهش کانبان‌های مراحل اولیه است.

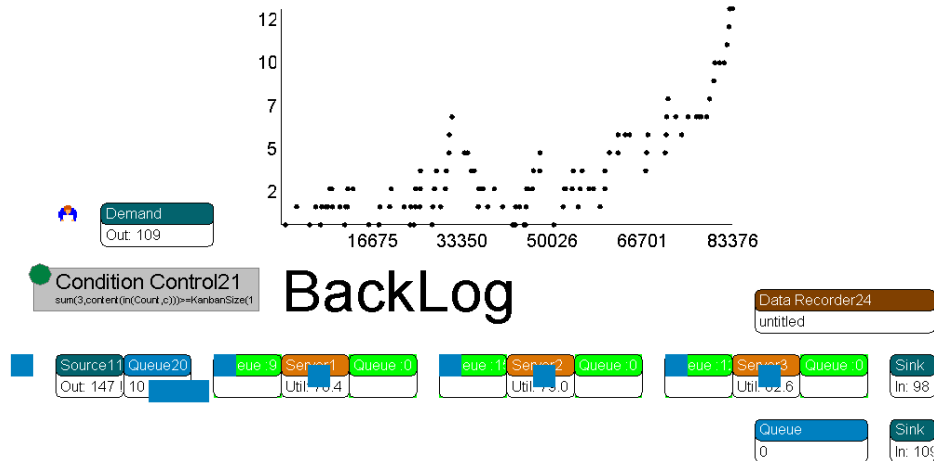
#### ۴- مدل شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی

در این بخش به ارائه فرضیات مسئله مورد بررسی و اطلاعات لازم برای ساخت مدل شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. برای ساخت مدل شبیه‌سازی سیستم کانبان تعمیم‌یافته، از نرم افزار شبیه‌سازی ED استفاده شده است. این نرم افزار شبیه‌سازی گسسته - پیشامد، یک محیط شبیه‌سازی شی‌گرا برای مدل‌سازی فرایندهای پیچیده تولیدی، لجستیکی و خدماتی است. دلیل استفاده از این نرم‌افزار، سهولت مدل‌سازی در آن، قدرت هسته شبیه‌سازی و انعطاف پذیری بالا در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده، به عنوان بستر مدل شبیه‌سازی است. در این نرم‌افزار، کاربر قادر خواهد بود با انتخاب موجودیت‌ها (با نام اتم در نرم‌افزار ED) از کتابخانه استاندارد و انتقال آنها به محیط گرافیکی دوبعدی، مدل مورد نظر را خود را طراحی نماید. کاربر می‌تواند اتم‌هایی با جزئیات مورد نظر (مانند یک

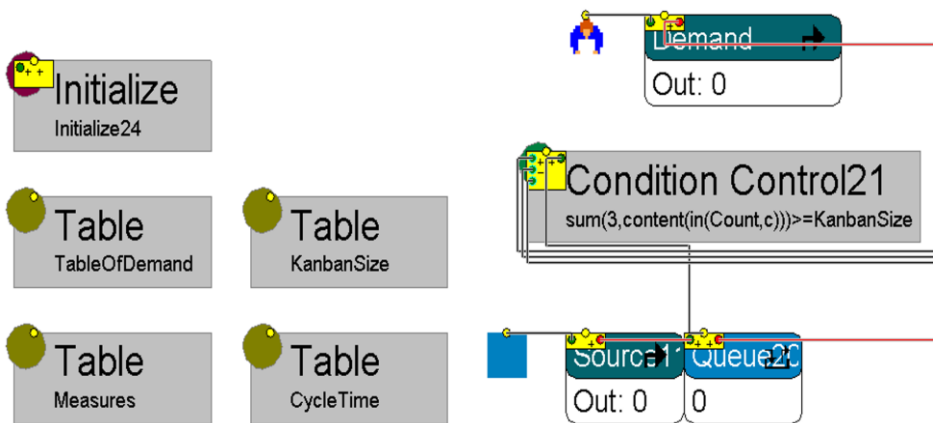


می‌شود. بخش اصلی مدل شبیه‌سازی، از اجزای خط تولید شامل ایستگاه‌های کاری، بافرهای ورودی و خروجی هر ایستگاه، کانبان‌ها و نهاده کنترل‌کننده سطح موجودی تشکیل شده است. با توجه به فقدان نهاده‌های از پیش طراحی شده در نرم افزار ED با جزئیات مورد نظر در این تحقیق، بافرهای ورودی و خروجی ایستگاه طراحی شده‌اند. رویدادها، مشخصه‌ها و برقراری ارتباطات با سایر نهاده‌های موجود تشکیل شده است. دستورات نوشته شده در بخش بافرهای ورودی و خروجی هر ایستگاه، برای برقراری فرضیات مسئله و کارکرد صحیح مدل شبیه‌سازی ضروری است.

شبیه‌سازی شامل جریان حرکت مواد و قطعات و همچنین ارتباط و تبادل اطلاعاتی بین نهاده‌ها، از کانال‌ها ورودی، خروجی و مرکزی استفاده می‌شود. بخش اول از مدل شبیه‌سازی مربوط به ورود تقاضای محصول نهایی به سیستم و جزئیات مربوط به آن است. این بخش از ۳ اتم شامل تولید تقاضا، صف تقاضا و خروج تقاضا به‌علاوه تعدادی از جداول مورد نیاز برای ثبت عملکرد سیستم و یا نگهداری پارامترهای مدل (تعداد کانبان‌ها و سطح موجودی پایه در هر مرحله) تشکیل شده است. در لحظه ورود یک تقاضا به سیستم، مجموعه‌ای از دستورات شامل فرستادن سیگنال تولید ایستگاه آخر، به‌روزرسانی مقدار تقاضای پس‌افت و بررسی وجود قطعه در بافر خروجی ایستگاه آخر انجام



شکل ۲: نمایی از کل مدل شبیه‌سازی خط تولید



شکل ۳: بخش ورود تقاضا به سیستم در مدل شبیه‌سازی



شکل ۴: بخش اصلی مدل شبیه‌سازی خط تولید شامل ایستگاه‌ها، بافرها و سایر اتم‌های تکمیلی

جدول ۲: دستورات نوشته شده در لحظه ورود یک تقاضا به سیستم

<b>Queue – Trigger on Entry</b>
<pre>do(setTableOfDemand(nRows(refTableOfDemand),2,Label([DemandSize],i)), setTableOfDemand(nRows(refTableOfDemand),1, TableOfDemand(nRows(refTableOfDemand),1)+Label([DemandSize],i)), setTableOfDemand(nRows(refTableOfDemand),3, TableOfDemand(nRows(refTableOfDemand),3)+Label([DemandSize],i)), SetMeasures(1,1, Measures(1,1)+Max(Label([DemandSize],i)-Content(out(1,c)),0)), ExecEvent(OnEntered,out(1,c),i), if(Content(out(3,c))&gt;0,ExecEvent(OnEntered,out(3,c),i)), if(and(KanbanSize(3,1)&gt;0,AtomExists(First(out(4,c))))), ExecEvent(OnEntered,out(4,c),i), if(and(KanbanSize(3,1)&gt;0,AtomExists(First(out(5,c))))), ExecEvent(OnEntered,out(5,c),i), if(and(KanbanSize(3,1)&gt;0,AtomExists(First(out(6,c))))), ExecEvent(OnEntered,out(6,c),i), if(and(KanbanSize(3,1)&gt;0,AtomExists(First(out(7,c))))), ExecEvent(OnEntered,out(7,c),i))</pre>

جدول ۳: دستورات بخش رویدادها در بافر خروجی ایستگاه آخر

<b>Output Buffer 3 – OnEvent</b>
<pre>Case(EventCode, {move} Repeat( Min(TableOfDemand(nRows(refTableOfDemand),1), Content(c)), MoveAtom(First(c),out(1,c)) ), {release card} SetKanbanSize(nRows(refKanbanSize),2, KanbanSize(nRows(refKanbanSize),2)+1) )</pre>

جدول ۴: دستورات بخش رویداد ورود در بافر ایستگاه آخر

<b>Output Buffer 3 – OnEntered</b>
<pre>if( TableOfDemand(nRows(refTableOfDemand),1)&gt;=1, CreateEvent(0,c,1))</pre>

جدول ۵: دستورات بخش رویداد خروج در بافر ایستگاه آخر

<b>Output Buffer 3 – OnEntered</b>
<pre>do( CreateEvent(0,c,2), if(Content(out(2,c))&gt;0,ExecEvent(OnEntered,out(2,c),i)))</pre>

جدول ۶: پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی خط تولید

پارامترهای توزیع	توزیع	پارامتر ورودی مدل شبیه‌سازی
در دو سناریو با میانگین (D) ۱۰ و ۵ دقیقه‌ای	نمایی	زمان بین دو ورود تقاضا
با فرض $a = b = 1$	یکنواخت گسسته در بازه [a,b]	اندازه تقاضا
میانگین ۱۰ دقیقه	نمایی	زمان پردازش ماشین‌ها

پارامترهای ورودی مدل شامل توزیع زمان بین دو ورود تقاضا به سیستم، توزیع اندازه تقاضا، توزیع زمان‌های پردازش، سطح موجودی پایه در هر ایستگاه است (جدول ۶). سطح موجودی پایه در تمامی ایستگاه‌ها مقدار ۲ در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که مواد اولیه همواره در ابتدای خط تولید به مقدار کافی موجود است و کمبود مواد اولیه رخ نمی‌دهد.

به دلیل ماهیت تصادفی مدل‌های شبیه‌سازی، یک نتیجه واحد به تنهایی نماینده مقدار خروجی یک شاخص آماری نیست. بنابراین، تعداد مشاهدات لازم به منظور به دست آوردن نتیجه قابل اعتماد با سطح مطلوبی از دقت مورد نیاز است. قابلیت اطمینان نتایج با استفاده از فاصله اطمینان بیان می‌شود که احتمال این که متغیر خروجی در محدوده مشخص شده قرار گیرد را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری هر شاخص کلیدی عملکرد، یک مشاهده در تکرار  $i$ ام ( $w_i$ ) شبیه‌سازی جمع‌آوری می‌شود. هر آماره بر اساس داده‌های خام ( $w_i$ ) برآورد می‌شود که در آن  $n$  تعداد دوره‌های مشاهده است. حد بالا و پایین محدوده فاصله اطمینان (CI) نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود. با توجه اندازه نمونه گرفته شده و مقادیر توزیع  $t$  نتایج با قابلیت اطمینان  $1 - \alpha$  به دست می‌آید.

$$CI = \begin{cases} \bar{w} \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} & n \leq 30 \\ \bar{w} \pm \mu_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} & n > 30 \end{cases} \quad (1)$$

در مطالعه شبیه‌سازی خط تولید، طول اجرای شبیه‌سازی برابر با ۶۰۰ ساعت، طول زمان گرم شدن مدل برابر با ۷۵ ساعت و تعداد اجراهای شبیه‌سازی ۵۰ تکرار در نظر گرفته شده است. در ادامه شرحی بر نحوه تنظیم این پارامترهای کلیدی شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

به منظور تعیین زمان گرم شدن مدل از نمایش یکی از متغیرهای کلیدی عملکرد سیستم در طول زمان استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمانی حدود

#### ۴-۲-۱- بخش ورود تقاضای تصادفی به سیستم

بخش اول از مدل شبیه‌سازی مربوط به ورود تقاضای محصول نهایی به سیستم و جزئیات مربوط به آن است (شکل (۳)). این بخش از ۳ اتم شامل تولید تقاضا، صف تقاضا و خروج تقاضا بعلاوه تعداد از جداول مورد نیاز برای ثبت عملکرد سیستم و یا نگهداری پارامترهای مدل (تعداد کابین‌ها و سطح موجودی پایه در هر مرحله) تشکیل شده است.

در لحظه ورود یک تقاضا به سیستم، مجموعه‌ای از دستورات شامل فرستادن سیگنال تولید ایستگاه آخر، بروز رسانی مقدار تقاضای پس‌افت و بررسی وجود قطعه در بافر خروجی ایستگاه آخر انجام می‌شود (جدول ۲).

#### ۴-۲-۲- بخش اصلی خط تولید

بخش اصلی مدل شبیه‌سازی، از اجزای خط تولید شامل ایستگاه‌های کاری، بافرهای ورودی و خروجی هر ایستگاه، کابین‌ها و جداول مربوطه و اتم‌هایی برای کنترل سطح موجودی تشکیل شده است (شکل (۴)). با توجه به نبودن نهاده‌ای از پیش تعریف و طراحی شده در نرم‌افزار ED با جزئیات مورد نظر در این پروژه، به طراحی اتم‌های معرف بافرهای ورودی و خروجی ایستگاه پرداخته شده است. طراحی یک نهاده جدید از جزئیاتی مانند تعریف رویدادهای مختلف، تعریف مشخصه‌ها و برقراری ارتباطات با سایر نهاده‌های موجود تشکیل شده است.

دستوراتی که در بخش خروج از ایستگاه‌ها نوشته شده است برای برقراری فرضیات مسئله و کارکرد صحیح مدل شبیه‌سازی می‌باشد. این دستورات در ادامه به تفکیک برای ایستگاه‌های مختلف و برای بافرهای ورودی و خروجی هر ایستگاه ارائه می‌شود. برای بافرهای ورودی و خروجی بافرهای ایستگاه آخر، مجموعه دستورات مربوط به رویدادهای اصلی در جداول ۳ الی ۵ خلاصه شده است.

#### ۴-۳- پارامترهای ورودی شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی برای یک خط تولید با سه ایستگاه و بافرهای ورودی و خروجی توسعه داده شده است.

تولید، تعداد مساوی کارت کانبان در نظر گرفته شود و به عبارتی رابطه  $k_1 = k_2 = k_3$  برقرار باشد. اما در حالت تخصیص غیریکنواخت، تعداد کانبان‌ها در هر مرحله می‌تواند متفاوت از سایر مراحل باشد. در مدل شبیه‌سازی همچنین سناریوی تغییر میانگین زمان بین دو ورود تقاضای محصول نهایی بررسی خواهد شد. به طور کلی معیارهای متنوعی را می‌توان به عنوان معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم مدنظر قرار داد که از جمله آن می‌توان به معیارهای مرتبط با ظرفیت، معیارهای مرتبط با تحویل به موقع (سطح خدمت ارائه شده به مشتری) مانند درصدی از تقاضا که بلافاصله برآورده و تامین شده است یا متوسط تقاضای پس‌افت، معیارهای مرتبط با سطح موجودی و معیارهای مرتبط با سیستم کانبان مانند متوسط تعداد کارت‌های کانبان که در بافر خروجی یک ایستگاه باقی می‌ماند، اشاره کرد.

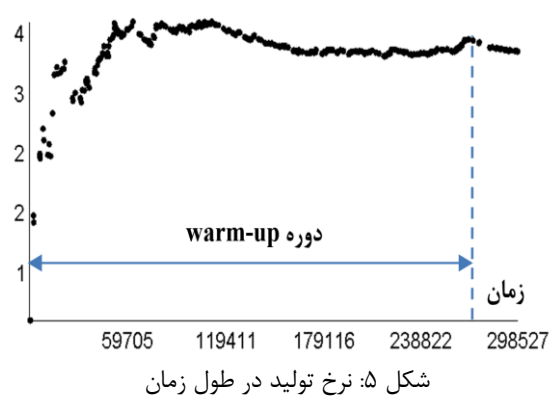
#### ۵-۱- تخصیص یکنواخت کانبان‌ها به مراحل مختلف

در این بخش به ارائه و سپس تحلیل نتایج حاصل از تخصیص یکسان کانبان‌ها به مراحل مختلف می‌پردازیم. این نتایج شامل شاخص‌های آماری مربوط به مقدار تولید، زمان تولید محصول، بهره‌وری ماشین آلات و سطح موجودی نیمه‌ساخته می‌باشد. نتایج متوسط مقدار تولید در دو سناریوی ورود تقاضا با میانگین ۵ و ۱۰ دقیقه در شکل (۷) نمایش شده است. تعداد کانبان‌ها در هر مرحله در بازه  $1 \leq k_i \leq 200$  انتخاب شده و بر اساس آن شبیه‌سازی خط تولید انجام شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود و نتایج نیز نشان می‌دهد، مقدار متوسط تولید با افزایش تعداد کانبان‌ها رشد کرده و سرعت رشد آن به تدریج کاسته می‌شود. از روی شکل (۷) می‌توان تعیین نمود که در حالت تخصیص یکنواخت کانبان‌ها به هر مرحله، با افزایش تعداد کانبان‌ها مقدار متوسط تولید نیز افزایش می‌یابد اما از مقدار ۳۰ عدد به بالا، تغییر چندانی در متوسط تولید حاصل نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که اضافه کردن کانبان‌های بیشتر به سیستم، نرخ تولید را افزایش نمی‌دهد و سیستم با حداکثر ظرفیت خود، فرآیند تولید را انجام می‌دهد.

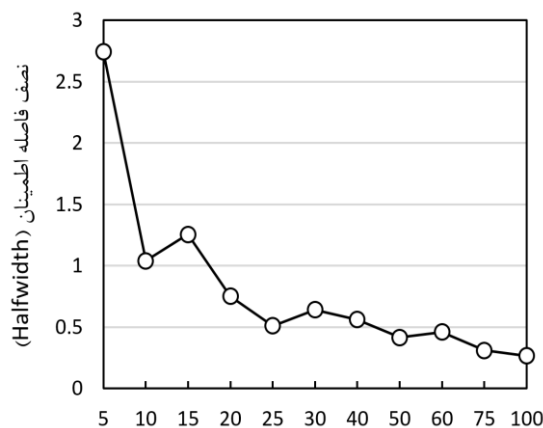
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تقریباً در دو الگوی تقاضا (میانگین ۵ و ۱۰ دقیقه‌ای)، متوسط مقدار تولید به ازای تعداد کانبان‌های مختلف رفتار مشابهی داشته و به دلیل

۲۷۰۰۰۰ ثانیه از شروع شبیه‌سازی، تقریباً به شرایط پایدار رسیده و در نتیجه می‌توان زمان گرم شدن مدل را برابر ۷۵ ساعت در نظر گرفت (شکل (۵)). همچنین به منظور تعیین تعداد تکرارهای مورد نیاز شبیه‌سازی، نمودار نصف فاصله اطمینان برای شاخص متوسط موجودی نیمه ساخته به ازای اندازه نمونه‌های مختلف ترسیم شده است (شکل (۶)). همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد تکرارهای شبیه‌سازی از ۵۰ به بعد، واریانس آماره مربوط به خروجی شبیه‌سازی، کاهش محسوسی نداشته و فاصله اطمینان به اندازه کافی کوتاه شده است. از این رو، افزایش تعداد مشاهدات از ۵۰ به بالا، بهبود قابل ملاحظه‌ای در کاهش واریانس نمونه را موجب نمی‌شود.

متوسط تولید در ساعت



شکل ۵: نرخ تولید در طول زمان



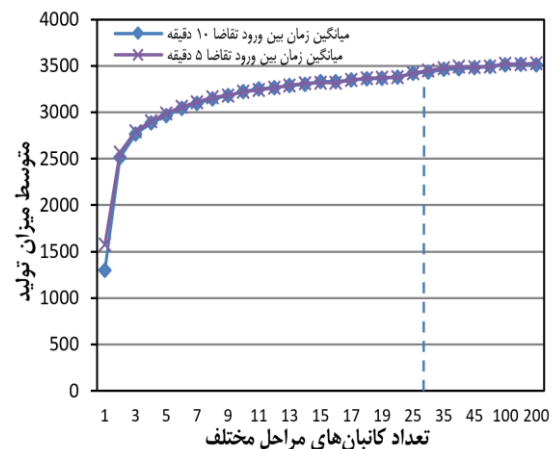
شکل ۶: نصف فاصله اطمینان برای شاخص متوسط موجودی نیمه‌ساخته در طول زمان

#### ۵- نتایج مدل شبیه‌سازی

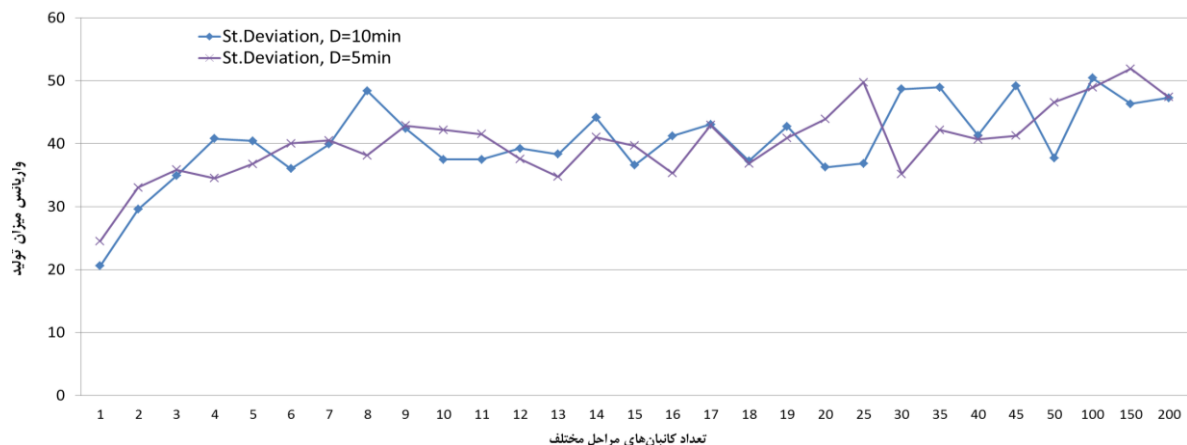
نتایج مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی تاثیر تعداد کانبان‌ها، در دو حالت کلی شامل تخصیص یکنواخت و غیریکنواخت کانبان‌ها به مراحل مختلف بررسی می‌شود. منظور از تخصیص یکنواخت کانبان‌ها این است که در هر مرحله از

وارینس مقدار تولید نیز با افزایش تعداد کانبان‌ها به تدریج افزایش می‌یابد و دامنه نوسان آن نیز بیشتر می‌شود (شکل (۸)). به دلیل وجود تقاضای پس‌افت و بالا بودن نرخ تقاضا، موجودی نیمه‌ساخته در بافر خروجی ایستگاه آخر عملاً ناچیز می‌باشد و هرچه به مراحل انتهایی خط تولید می‌رسیم، متوسط حجم موجودی نیمه‌ساخته کاهش می‌یابد. به ازای افزایش تعداد کانبان‌ها در هر مرحله، متوسط کل سطح موجودی نیمه‌ساخته و متوسط تعداد قطعه در هر بافر مربوط به ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد (شکل (۹)). همان‌طور که مشاهده می‌شود تقریباً یک رابطه خطی بین تعداد کل کانبان‌های خط تولید و متوسط کل سطح موجودی نیمه‌ساخته وجود دارد. به عبارتی مثلاً با دو برابر شدن تعداد کل کانبان‌ها، متوسط موجودی نیمه‌ساخته نیز دو برابر می‌شود.

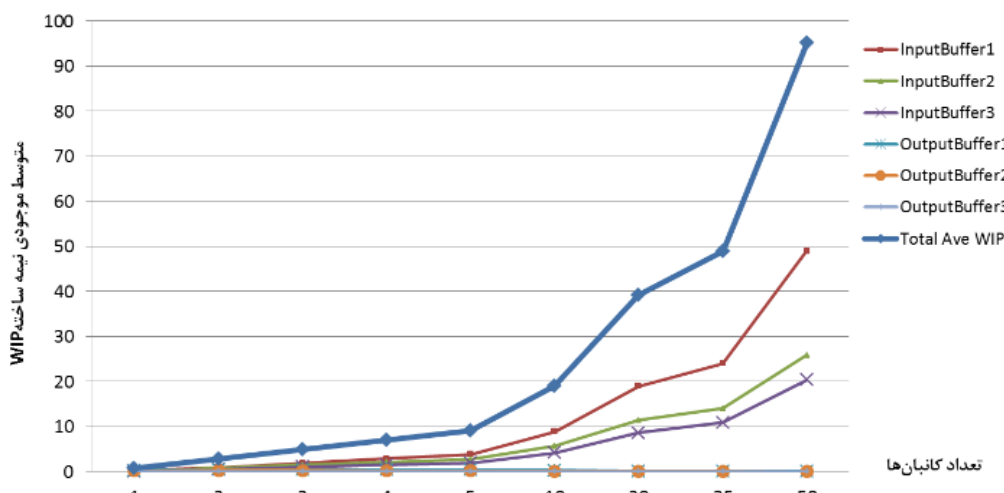
ظرفیت ماشین‌ها و متوسط زمان پردازش، با افزایش نرخ ورود تقاضا، متوسط مقدار تولید تغییر چندانی نداشته است (شکل (۷)).



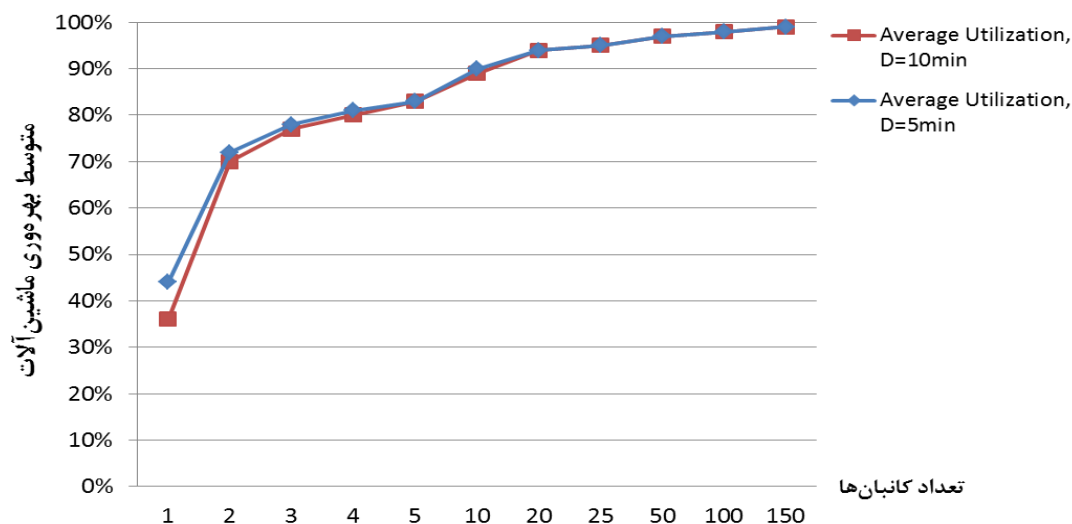
شکل ۷: افزایش متوسط میزان تولید با افزایش تعداد کانبان‌ها



شکل ۸: افزایش واریانس مقدار تولید به ازای افزایش کانبان‌ها



شکل ۹: تغییرات متوسط کل سطح موجودی نیمه‌ساخته خط با افزایش تعداد کانبان‌ها به همراه داده‌های تفکیک‌شده در بافرهای مختلف



شکل ۱۰: متوسط بهره‌وری به ازای افزایش تعداد کانبان‌ها

شکل ۱۱: تقاضای پس‌افت در طول زمان ( $K_i = 30$ ) و ( $D = 10 \text{ min}$ )شکل ۱۲: تقاضای پس‌افت در طول زمان ( $K_i = 200$ ) و ( $D = 10 \text{ min}$ )

در حالی که تقاضا کاهش می‌یابد، انتظار می‌رود سطح موجودی پس‌افت، رفتار پایداری داشته باشد و حداکثر سطح تقاضای پس‌افت از حد مشخصی بیشتر نشود. در حالی که میانگین زمان بین دو ورود تقاضا افزایش می‌یابد، مقدار تقاضای تامین نشده به حالت پایدار نزدیک می‌شود. اگر زمان بین دو ورود تقاضا  $D = 15$  دقیقه باشد، سیستم

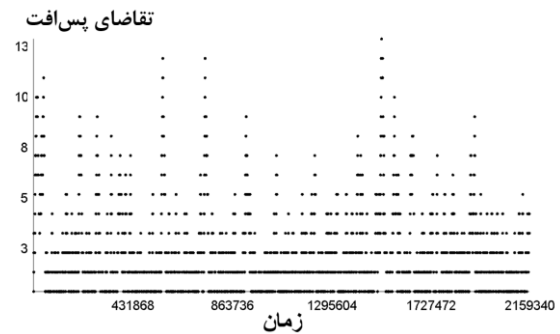
بهره‌وری ماشین‌ها تحت تاثیر مستقیم تعداد کانبان‌ها است و از این‌رو در این بخش به ارزیابی نتایج حاصل از افزایش تعداد کانبان‌ها روی متوسط بهره‌وری خط تولید پرداخته شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود و نتایج شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهد، متوسط بهره‌وری ماشین‌ها با افزایش تعداد کانبان‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد کانبان تا اندازه  $K_i = 150$ ، درصد بهره‌وری ماشین‌ها به تقریباً ۱۰۰٪ می‌رسد. در سناریویی که میانگین زمان بین دو ورود تقاضا برابر با ۵ دقیقه است ( $D = 5$ )، نرخ بهره‌وری ماشین‌ها نسبت به سناریوی  $D = 10$  دقیقه در وضعیت بهتری قرار دارد و این اختلاف با افزایش تعداد کانبان‌ها کاهش می‌یابد (شکل (۱۰)).

در ادامه، تاثیر افزایش تعداد کانبان‌ها روی تقاضای پس‌افت بررسی شده است. انتظار می‌رود که با افزایش تعداد کانبان‌ها، مقدار تقاضای پس‌افت رشد کمتری داشته باشد. نتایج شبیه‌سازی، تاثیر افزایش تعداد کانبان‌ها  $K_i$  در هر مرحله روی تقاضای پس‌افت (در حالت ثابت بودن میانگین زمان بین دو ورود تقاضا  $D = 10$  دقیقه) را نشان می‌دهند. با افزایش تعداد کانبان‌ها، سطح تقاضای پس‌افت کاهش می‌یابد اما کماکان روند صعودی دارد چراکه میانگین زمان بین دو ورود تقاضا  $D = 10$  دقیقه بوده و میانگین زمان‌های پردازش ماشین‌ها نیز یکسان و برابر با ۱۰ دقیقه است. با افزایش تعداد کانبان‌ها به مقدار  $K_i = 150$  و به خصوص  $K_i = 200$  در هر مرحله، تقاضای پس‌افت کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند اما کماکان با ناپایداری همراه بوده و روند روبه‌رشد داشته است (شکل (۱۲)).

عبارتی در حالت مساوی بودن تعداد کانبان‌ها در هر مرحله، لزوماً شاخص‌های ارزیابی سیستم در بهترین وضعیت خود قرار ندارند. خصوصاً در زمانی که میانگین زمان‌های پردازش ماشین‌ها متفاوت باشد، آنگاه تنظیم تعداد کانبان‌ها در مراحل مختلف می‌تواند معیارهای عملکردی سیستم را بهبود بخشد. در این بخش، سناریوهای مختلف تخصیص غیریکنواخت کانبان‌ها به مراحل تولیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ۱۷ سناریو از تخصیص غیریکنواخت کانبان‌ها به مراحل مختلف شبیه‌سازی شده است. ابتدا فرض شده است که تعداد کل کانبان‌ها ثابت و برابر  $k_1 + k_2 + k_3 = 30$  می‌باشد.

سناریوی اول، تخصیص یکنواخت  $k_i = 30$  در نظر گرفته شده است تا با سایر تخصیص‌های غیریکنواخت مورد مقایسه قرار بگیرد. نتایج متوسط میزان تولید در حالت سناریوهای تخصیص غیریکنواخت کانبان‌ها به مراحل مختلف در جدول ۷ خلاصه شده است. با توجه به اینکه بر اساس تخصیص غیریکنواخت تعداد کانبان‌ها به ایستگاه‌ها، تعداد قابل توجهی سناریو قابل تولید است، تنها تعداد محدودی سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرد. این سناریوهای مختلف بر اساس میزان تخصیص بیشتر به یکی از مراحل تولیدی با سناریو دیگر متمایز شده است.

در این شرایط بصورت پایدار عمل می‌کند، چراکه متوسط زمان بین دو ورود تقاضا (۱۵ دقیقه) طولانی‌تر از متوسط زمان خدمت دهی یا همان متوسط زمان پردازش ماشین‌ها (۱۰ دقیقه) است. در این حالت، تعداد کانبان‌ها افزایش و سطح تقاضای پس‌افت کاهش می‌یابد (شکل (۱۳)). نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد کانبان‌ها از  $K_i = 10$  به  $K_i = 30$ ، حداکثر سطح تقاضای پس‌افت از ۱۷ به ۱۳ کاهش یافته است.



شکل ۱۳: سطح تقاضای پس‌افت در طول زمان ( $K_i = 30$ ) و  $(D = 15 \text{ min})$

**۵-۲- تخصیص غیریکنواخت کانبان‌ها به مراحل مختلف**  
تخصیص یکسان و یکنواخت کانبان‌ها به ایستگاه‌ها و یا به

جدول ۷: نتایج شاخص‌های آماری مربوط به میزان تولید در سناریوهای تخصیص غیریکنواخت کانبان‌ها به مراحل مختلف

شماره	$k_1$	$k_2$	$k_3$	Ave	STD	LB (95%)	UB (95%)
1	10	10	10	3219.22	40.7	3207.93	3230.51
2	15	10	5	3116.86	41.33	3105.4	3128.32
3	5	10	15	3110.96	36.9	3100.73	3121.19
4	20	5	5	3123.82	40.18	3112.68	3134.96
5	5	5	20	3131.72	37.66	3121.28	3142.16
6	10	15	5	3071.7	33.01	3062.54	3080.86
7	5	15	10	3080.94	37.79	3070.46	3091.42
8	5	20	5	2976.68	38.38	2966.04	2987.32
9	15	5	10	3267.3	34.09	3257.85	3276.75
10	10	5	15	3270.14	36.87	3259.91	3280.37
11	14	2	14	3298.76	38.12	3288.19	3309.33
12	14	1	15	2251.56	53.53	2236.71	2266.41
13	8	2	20	3234.08	39.23	3223.2	3244.96
14	3	2	25	2972.48	45.97	2959.73	2985.23
15	20	2	8	3243.16	44.75	3230.75	3255.57
16	18	2	10	3272.4	34.95	3262.71	3282.09
17	16	2	12	3306.46	48.19	3293.10	3319.82

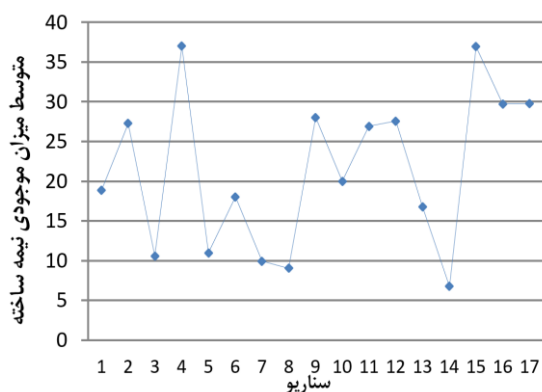
جدول ۸: مقایسه حالت‌های مختلف رویکرد تنظیم پویای تعداد کانبان‌های مراحل مختلف (D = 10min)

m	$\Delta$	stages	Ave	STD	LB (95%)	UB (95%)
0	0	-	3219.58	37.48	3209.18	3229.98
1	5	2,3	3228.24	35.05	3218.52	3237.96
5	5	2,3	3241.64	38.73	3230.9	3252.38
10	5	2,3	3231.92	38.08	3221.36	3242.48
1	7	2,3	3225.3	37.98	3214.77	3235.83
5	7	2,3	3230.88	38.96	3220.08	3241.68
10	7	2,3	3240.46	43.86	3228.3	3252.62

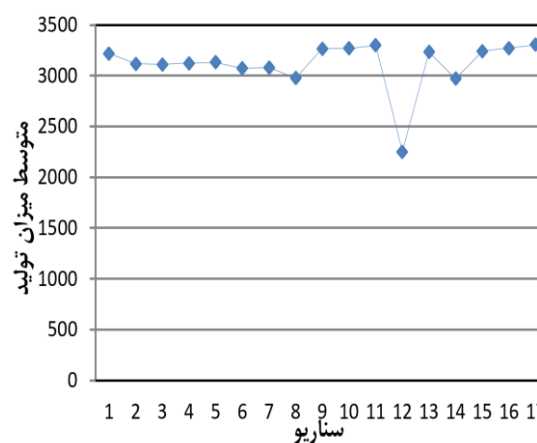
جدول ۹: مقایسه حالت‌های مختلف رویکرد تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها در مراحل مختلف (D = 15min)

m	$\Delta$	stages	Ave	STD	LB (95%)	UB (95%)
0	0	-	2397.52	50.2	2383.6	2411.44
1	5	2,3	2388.68	51.14	2374.5	2402.86
5	5	2,3	2405.36	52.97	2390.67	2420.05
10	5	2,3	2404.72	53.65	2389.84	2419.6
15	5	2,3	2392.7	46.16	2379.9	2405.5
1	7	2,3	2397.42	41.77	2385.84	2409
5	7	2,3	2407.86	52.62	2393.27	2422.45
10	7	2,3	2397	54.25	2381.95	2412.05
15	7	2,3	2413.04	52.31	2398.53	2427.55
20	7	2,3	2403.56	43.43	2391.52	2415.6

مقدار تخصیص کانبان‌ها به هر مرحله باید از حد مشخصی کمتر نشود. بهترین سناریوی از بین سناریوهای موجود نیز سناریوی آخر است که در آن  $k_1 = 16$ ،  $k_2 = 2$  و  $k_3 = 12$  است (شکل ۱۴). نتایج متوسط سطح موجودی نیمه‌ساخته نشان می‌دهد که در بین سناریوهای موجود، سناریوی  $k_1 = 3$ ،  $k_2 = 2$  و  $k_3 = 25$  کمترین متوسط موجودی نیمه‌ساخته را داشته است (شکل ۱۵).



شکل ۱۵: میزان متوسط موجودی نیمه‌ساخته در سناریوهای مختلف تخصیص غیریکنواخت کانبان



شکل ۱۴: متوسط میزان تولید در سناریوهای مختلف تخصیص غیریکنواخت کانبان‌ها به مراحل مختلف

نتایج نشان می‌دهد که هرچه تعداد کانبان‌های بیشتری به مراحل اول و سوم تخصیص یابد، آنگاه عملکرد بهتری از نظر میزان تولید بدست خواهد آمد. البته تعداد کانبان تخصیص داده شده به ایستگاه دوم نباید کمتر از ۲ واحد باشد. همچنین بهتر است تعداد کانبان‌ها در ایستگاه اول بیشتر از ایستگاه سوم باشد. این موضوع نشان می‌دهد که



است منجر به افزایش سطح موجودی و یا بلوکه شدن ایستگاه‌ها شود. همچنین باید کاهش یا افزایش تعداد کانبان‌ها در اندازه مناسبی انجام شود تا از بیکاری ماشین‌ها و افزایش سطح موجودی جلوگیری شود.

در روش پیشنهادی، اگر مقدار تقاضای پس‌افت از مقدار از قبل تعیین شده‌ای مانند  $m$  مساوی یا بیشتر شود، آنگاه تعداد کانبان‌های مراحل مختلف به نحوی افزایش یا کاهش یابد و مجدداً با پایین آمدن سطح موجودی پس‌افت از مقدار  $m$ ، تغییر تعداد کانبان‌ها صورت گیرد. مقدار کاهش تعداد کانبان‌ها از یک مرحله با مقدار افزایش آن در مرحله دیگر یکسان فرض شده و با نماد  $\Delta$  نمایش داده می‌شود.

نتایج بدست آمده از مدل شبیه‌سازی در جدول ۸ خلاصه شده است. در تمامی حالات فرض شده است که تغییرات تعداد کانبان‌ها در مراحل ۲ و ۳ انجام شده است و مرحله اول تولید، تعداد کانبان ثابتی دارد. اولین ردیف از این جدول نیز سناریویی است که تنظیم پویای کانبان‌ها در آن رخ نمی‌دهد و صرفاً برای مقایسه با سایر سناریوها آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیاست تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها تأثیر مثبتی روی افزایش نرخ تولید محصول نهایی داشته است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حالت  $D=10$  دقیقه و به ازای  $m=5$  و  $\Delta=5$ ، متوسط مقدار تولید نسبت به سایر حالت‌ها در وضعیت بهتری قرار دارد. مطابق با نتایج بدست آمده، میزان تقاضای پس‌افت در طول زمان در حالت ( $m=5$  و  $\Delta=7$ ) رشد کمتری داشته و تقاضای کمتری در حالت پس‌افت بوده است.

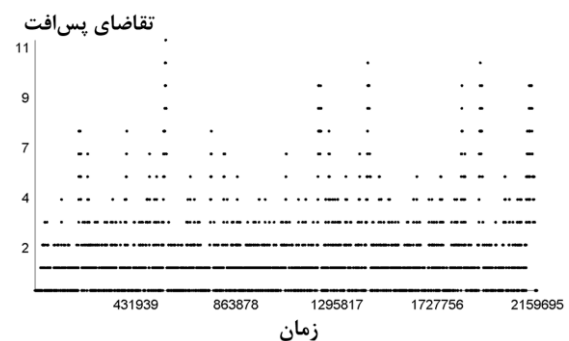


شکل ۱۷: تقاضای پس‌افت در طول زمان (حالت  $m=5$  و  $\Delta=7$ )

در سناریو دیگری که میانگین زمان بین دو ورود تقاضا ۱۵ دقیقه فرض شده است ( $D=15$  دقیقه)، مقایسه‌ای بین حالت‌های مختلف رویکرد تنظیم پویای تعداد کانبان‌های

نتایج بهره‌وری ماشین‌آلات نشان می‌دهد که تخصیص کانبان‌ها به مراحل مختلف در صورتی که از یک حد مشخصی کمتر نباشد، آنگاه بهره‌وری ماشین‌آلات تقریباً یکسان است. همچنین بالاترین بهره‌وری (۹۲٪) برای سناریوهای ۱۱ با اطلاعات  $k_1=14$ ،  $k_2=2$  و  $k_3=14$ ، سناریوی ۱۶ با اطلاعات  $k_1=18$ ،  $k_2=2$  و  $k_3=10$  و سناریوی آخر با اطلاعات  $k_1=16$ ،  $k_2=2$  و  $k_3=12$  بدست آمده است. تأثیر تخصیص غیریکنواخت تعداد کانبان‌ها  $K_i$  در هر مرحله روی تقاضای پس‌افت در حالات مختلف ورود تقاضا و برای سناریوهای منتخب با توجه به معیارهای قبلی، حاصل شده است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش تقاضای پس‌افت تنها در سناریوی ( $k_1=14$ ،  $k_2=2$ ،  $k_3=14$ ) نسبت به سناریوی تخصیص یکسان کانبان‌ها به مراحل، رخ داده است. در سناریوی فوق، حداکثر تقاضای پس‌افت از ۱۶ به ۱۱ کاهش یافته است (شکل (۱۶)).



شکل ۱۶: تقاضای پس‌افت (حالت  $k_1=14$ ،  $k_2=2$ ،  $k_3=14$  و  $D=15\text{min}$ )

### ۵-۳- نتایج سیاست تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها

در این بخش رویکرد پیشنهادی در این تحقیق و تأثیر آن روی معیارهای ارزیابی سیستم ارزیابی می‌شود. رویکرد پیشنهادی، تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها در هر مرحله با اطلاعات مقدار تقاضای پس‌افت در ایستگاه آخر است. یک راه برای مقابله با تغییرات تقاضا و زمان‌های پردازش، افزایش تعداد کانبان‌های تولید در ایستگاه آخر است. بدین ترتیب که مقدار افزایش در تعداد کانبان‌ها و تولید مداوم قطعات تا میزانی خواهد بود که کل تقاضای پس‌افت تامین گردد [۱۱]. در این حالت افزایش تعداد کانبان‌ها نباید بیشتر از تقاضا شود. زمان مناسب برای افزایش تعداد کانبان‌ها هم از اهمیت زیادی برخوردار است چراکه اگر این تغییر زودتر یا دیرتر از زمان مناسب انجام شود، آنگاه ممکن

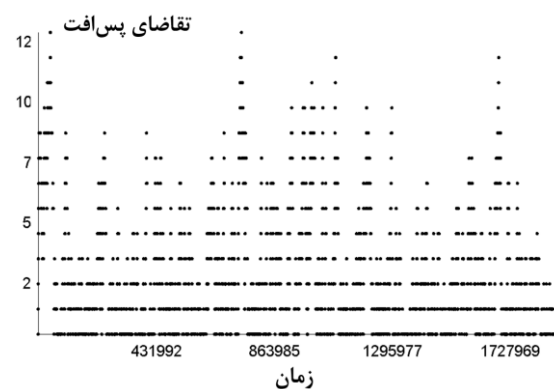
مراحل مختلف در جدول ۹ ارائه شده است. در ردیف اول این جدول، سناریوی ثابت بودن تعداد کانبان‌ها ارائه شده تا مقایسه آن با حالت‌های مختلف تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها انجام شود.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حالت  $D=15$  دقیقه و به ازای  $m=15$  و  $\Delta=7$ ، متوسط مقدار تولید نسبت به سایر حالت‌ها در وضعیت بهتری قرار دارد. همچنین مقایسه حالت‌های مختلف  $m$  و  $\Delta$  و سناریو کانبان با اندازه ثابت و ایستا نشان می‌دهد که با تعیین مناسب این پارامترها می‌توان عملکرد سیستم کانبان با سیاست تنظیم پویای کانبان‌ها را نسبت به حالتی که تعداد کانبان‌ها ثابت باشد، از نظر میزان تولید بهبود بخشید. نتایج مربوط به تغییرات مقدار تقاضای پس‌افت نیز به ازای  $D=15$  دقیقه و در حالت‌های مختلف پارامترهای  $m$  و  $\Delta$ ، در شکل (۱۸) ترسیم شده است. مطابق با نتایج بدست آمده، میزان تقاضای پس‌افت در طول زمان در حالت  $(D=5)$  و  $(m=10)$  رشد کمتری داشته و تقاضای کمتری در حالت پس‌افت بوده است. بیشینه تقاضای پس‌افت این سناریو نیز برابر با ۱۲ بوده و نسبت به سایر سناریوها در وضعیت بهتری قرار دارد.

تخصیص کانبان‌ها به مراحل مختلف بررسی شد. در انتهای تحقیق نیز به ارائه نتایج شبیه‌سازی و معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم در سیاست تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها پرداخته شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بکارگیری سیاست تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها و تعیین مناسب پارامترهای  $m$  و  $\Delta$  در طول فرآیند تولید می‌تواند افزایش نرخ تولید و کاهش تقاضای پس‌افت را به همراه داشته باشد. با توجه به تاثیر خرابی تجهیزات و ماشین‌آلات روی عملکرد سیستم کششی، می‌توان این موضوع را در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار داد. همچنین سیستم کاملاً کششی در شرایط تولیدی متغیر، کارایی پایینی داشته و بهتر است از ترکیب سیستم‌های کششی و فشاری با در نظر گرفتن بافرهای کنترل‌شده بین مراکز کاری استفاده شود. تحقیقات زیادی در حوزه سیستم کانبان اولیه صورت گرفته اما مقالات کمی سیستم کانبان توسعه‌یافته و مطالعه فاکتورهایی مانند تقاضا، خرابی ماشین‌آلات و تعداد کانبان‌ها را مد نظر قرار داده‌اند. به خصوص، مسئله تعیین تعداد کانبان‌ها در سیستم کانبان تعمیم‌یافته به تحقیقات بیشتری نیازمند است. از این رو پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی موارد زیر مدنظر قرار بگیرد:

۱- توسعه الگوریتم‌های هوشمند برای بهینه‌سازی سطح موجودی و بهبود شاخص‌های کلیدی عملکرد خط تولید در سیستم کانبان تعمیم‌یافته.

۲- استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به منظور بهینه‌سازی سطح پاسخ و شاخص‌های عملکردی توسعه مدل شبیه‌سازی برای خطوط با ساختار پیچیده‌تر مانند خطوط موازی و تغذیه‌کننده خط اصلی.



شکل ۱۸- تقاضای پس‌افت در طول زمان (حالت  $D=5$  و  $m=10$ )

## ۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

زمانی که سیستم تولیدی در معرض نوسانات در عرضه و تقاضا است، می‌توان از مزایای تغییر تعداد کانبان‌ها به صورت پویا استفاده نمود. در این تحقیق یک مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی سیستم کانبان تعمیم‌یافته توسعه داده شد. برای بهبود شاخص‌های کلیدی عملکرد خط تولید، یک سیاست تنظیم پویای تعداد کانبان‌ها پیشنهاد شد. سپس نتایج مدل شبیه‌سازی برای حالت‌های مختلف

## ۶- مراجع

- [1] P.L. González-r, J.M. Framinan, and H. Pierreval, "Token-based pull production control systems: an introductory overview", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 23, No. 1, 2012, pp. 5-22.
- [2] N. Selvaraj, "Determining the Number of Kanbans in EKCS: A Simulation Modeling Approach", in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2009.
- [3] G. Liberopoulos, and Y. Dallery, "A unified framework for pull control mechanisms in multi-stage manufacturing systems", *Annals of Operations Research*, Vol. 93, No. 1-4, 2000, pp. 325-355.
- [4] Y. Monden, "Smoothed Production Helps Toyota Adapt to Demand Changes and Reduce Inventory", in *Toyota Production System*, Springer, 1994, pp. 63-73.
- [5] T. Ōno, "Toyota production system: beyond large-scale production", Productivity press, 1988.
- [6] Y. Sugimori, et al., "Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system", *The International Journal of Production Research*, Vol. 15, No. 6, 1977, pp. 553-564.
- [7] M. Lage Junior, and M. Godinho Filho, "Variations of the kanban system: literature review and classification", *International Journal of Production Economics*, Vol. 125, No. 1, 2010, pp. 13-21.
- [8] S.C. Aggarwal, and S. Aggarwal, "The management of manufacturing operations: an appraisal of recent developments", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 5, No. 3, 1985, pp. 21-38.
- [9] H. Grünwald, P. Striekwold, and P. Weeda, "A framework for quantitative comparison of production control concepts", *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, Vol. 27, No. 2, 1989, pp. 281-292.
- [10] L.P. Rees, et al., "Dynamically adjusting the number of kanbans in a just-in-time production system using estimated values of leadtime", *IIE transactions*, Vol. 19, No. 2, 1987, pp. 199-207.
- [11] S.M. Gupta, and Y.A. Al-Turki, "An algorithm to dynamically adjust the number of kanbans in stochastic processing times and variable demand environment", *Production Planning & Control*, Vol. 8, No. 2, 1997, pp. 133-141.
- [12] J.F. BARD, and B. GOLANY, "Determining the number of kanbans in a multiproduct, multistage production system", *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, Vol. 29, No. 5, 1991, pp. 881-895.
- [13] K. Ohno, "The optimal control of just-in-time-based production and distribution systems and performance comparisons with optimized pull systems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 213, No. 1, 2011, pp. 124-133.
- [14] N. Selvaraj, "Determining the number of Kanbans in EKCS: a simulation modeling approach", in *Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists IMECS*, 2009.
- [15] S. Gstettner, and H. KUHN, "Analysis of production control systems kanban and CONWIP", *International journal of production research*, Vol. 34, No. 11, 1996, pp. 3253-3273.
- [16] M.D. Mascolo, Y. Frein, and Y. Dallery, "An analytical method for performance evaluation of kanban controlled production systems", *Operations Research*, Vol. 44, No. 1, 1996, pp. 50-64.
- [17] O. Wormgoor, "Performance evaluation of generalized kanban systems", *Dissertation, Faculty of Mechanical Engineering, University of Twente, Twente, Netherlands*, 2001.
- [18] C. Alabas, F. Altiparmak, and B. Dengiz, "The optimization of number of kanbans with genetic algorithms", simulated annealing and tabu search. in *Evolutionary Computation, Proceedings of the 2000 Congress on, IEEE*, 2000.
- [19] H. Aytug, C.A. Dogan, and G. Bezmez, "Determining the number of kanbans: a simulation metamodeling approach", *Simulation*, Vol. 67, No. 1, 1996, pp. 23-32.
- [20] K. Ohno, K. Nakashima, and M. Kojima, "Optimal numbers of two kinds of kanbans in a JIT production system", *The International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 5, 1995, pp. 1387-1401.
- [21] M. Özbayrak, G. Cagil, and C. Kubat, "How successfully does JIT handle machine breakdowns in an automated manufacturing system?", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 15, No. 6, 2004, pp. 479-494.
- [22] J.A. Buzacott, and J.G. Shanthikumar, "Design of manufacturing systems using queueing models", *Queueing Systems*, Vol. 12, No. 1-2, 1992, pp. 135-213.
- [23] C. Duri, Y. Frein, and M. Di Mascolo, "Comparison among three pull control policies: kanban, base stock, and generalized kanban", *Annals of Operations Research*, Vol. 93, No. 1-4, 2000, pp. 41-69.
- [24] S. Kotani, T. Ito, and K. Ohno, "Sequencing problem for a mixed-model assembly line in the Toyota production system", *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 23, 2004, pp. 4955-4974.

- [25] E. Gaury, H. Pierreval, and J.P. Kleijnen, "An evolutionary approach to select a pull system among Kanban, Conwip and Hybrid", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 11, No. 2, 2000, pp. 157-167.
- [26] L.L.P. Marand, et al., "An Adaptive Kanban and Production Capacity Control Mechanism", *Advances in Production Management Systems, Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services*, Springer, 2013, pp. 452-459.
- [27] P. Renna, L. Magrino, and R. Zaffina, "Dynamic card control strategy in pull manufacturing systems", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 26, No. 9, 2013, pp. 881-894.
- [28] M. Ettl, and M. Schwehm, "A design methodology for Kanban-controlled production lines using queuing networks and genetic algorithms", *Interne Bericht IMMD*, Vol. 7, 1994, pp. 15-94.
- [29] S. Chaharsooghi, and A. Sajedinejad, "Determination of the number of kanbans and batch sizes in a JIT supply chain system", *Sci Iran*, Vol. 17, No. 2, 2010, pp. 143-149.
- [30] Y. Dallery, and G. Liberopoulos, "Extended kanban control system: combining kanban and base stock", *Iie Transactions*, Vol. 32, No. 4, 2000, pp. 369-386.
- [31] C. Alabas, F. Altiparmak, and B. Dengiz, "A comparison of the performance of artificial intelligence techniques for optimizing the number of kanbans", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, No. 8, 2002, pp. 907-914.
- [32] P. Shahabudeen, K. Krishnaiah, and M.T. Narayanan, "Design of a two-card dynamic kanban system using a simulated annealing algorithm", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, No. 10-11, 2003, pp. 754-759.
- [33] D.E. Koulouriotis, A.S. Xanthopoulos, and V.D. Tourassis, "Simulation optimisation of pull control policies for serial manufacturing lines and assembly manufacturing systems using genetic algorithms", *International Journal of Production Research*, Vol. 48, No. 10, 2010, pp. 2887-2912.
- [34] L.S. Belisário, and H. Pierreval, "Using genetic programming and simulation to learn how to dynamically adapt the number of cards in reactive pull systems", *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, No. 6, 2015, pp. 3129-3141.
- [35] P. Renna, "A fuzzy control system to adjust the number of cards in a CONWIP-based manufacturing system", *International Journal of Services and Operations Management*, Vol. 20, No. 2, 2015, pp. 188-206.
- [36] G. Pedrielli, A. Alfieri, and A. Matta, "Integrated simulation-optimisation of pull control systems", *International Journal of Production Research*, Vol. 53, No. 14, 2015, pp. 4317-4336.
- [37] F. Lolli, et al., "A simulative approach for evaluating alternative feeding scenarios in a kanban system", *International Journal of Production Research*, Vol. 54, No. 14, 2016, pp. 4228-4239.
- [38] E. Pierreval, et al. "A simulation optimization approach for reactive ConWIP systems", in *Modelling and Simulation (EUROSIM)*, 2013 8th EUROSIM Congress on, IEEE, 2013.
- [39] K. Takahashi, "Comparing reactive Kanban systems", *International Journal of Production Research*, Vol. 41, No. 18, 2003, pp. 4317-4337.
- [40] G. Liberopoulos, et al., "Stochastic Modeling of Manufacturing Systems", Springer, 2006.
- [41] R.J. GRAVES, J.M. KONOPKA, and R.J. MILNE, "Literature review of material flow control mechanisms", *Production Planning & Control*, Vol. 6, No. 5, 1995, pp. 395-403.
- [42] L.P. Rees, P.Y. Huang, and B.W. Taylor III, "A comparative analysis of an MRP lot-for-lot system and a Kanban system for a multistage production operation", *International journal of production research*, Vol. 27, No. 8, 1989, pp. 1427-1443.
- [43] J.A. Buzacott, "Queueing models of kanban and MRP controlled production systems", *Engineering costs and production economics*, Vol. 17, No. 1, 1989, pp. 3-20.
- [44] P. Zipkin, "A kanban-like production control system: analysis of simple models", Preprint, 1989.