نشریه علمی کاوشهای مدیریت بازرگانی
سال یازدهم، شماره بیست و یکم، بهار و تابستان ۱۳۹۸

# ارتقاء عملکرد کسب و کار با بهبود بهره‌وری و سودآوری خط تولید

مصطفی زندیه[۱*]، سیمامطلبی[۲]
[۱] دانشیار گروه مدیریت صنایع، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی
[۲] دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰٤/۰۸

## چکیده

با توجه به رقابتی‌تر شدن محیط تولید در سال‌های گذشته، مدیران شرکت‌های تولیدی سعی دارند با افزایش بهره‌وری و سودآوری، باعث ارتقاء عملکرد کسب و کارشان شوند. در این راستا، نگهداری و تعمیرات نقش مهمی در افزایش کارایی و اثربخشی خط تولید و کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت ایفا می‌کند که در نتیجه موجب بهبود بهره‌وری و سودآوری خواهد شد. در این مقاله یک مدل شبیه‌سازی مربوط به عملکرد سیستم‌های تولید به‌هنگام در شرایط عملیاتی مختف و با سیاست‌های نگهداری و تعمیرات مختلف ارائه می‌شود. مدل شبیه‌سازی برای یک خط تولید که شامل پنج ایستگاه کاری و مبتنی بر سفارش است، طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بکارگیری نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط، برای ماشین‌آلات تولید و مونتاژ باعث بهبود بهره‌وری و سودآوری خط تولید خواهد شد. به دلیل وجود تعاملات پیچیده بین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات و اثرات آنها بر دارایی‌های سیستم، جهت مدل‌سازی از شبیه‌سازی گسسته پیشامد استفاده شده است.

کلمات کلیدی: بهره‌وری، سودآوری، تولید به‌هنگام، نگهداری و تعمیرات، شبیه‌سازی گسسته پیشامد

[*]- نویسنده مسئول: Email: m_zandieh@sbu.ac.ir

**مقدمه**

در محیط رقابتی امروز، که حاشیه سود اندک و انتظارات مشتری برای محصولات باکیفیت بسیار بالاست و زمان‌های انتظار باید بسیار کوتاه باشد، شرکت‌ها مجبور به کسب مزیت از تمامی فرصت‌ها برای بهینه‌کردن فرآیندهای کسب و کارشان هستند (هوشمندی و امیری، ۱۳۹۱). بهره‌وری، کلید رقابت‌پذیری برای ارتقاء محیط کسب و کار بوده و ضامن دستیابی به توسعه پایدار سازمان‌ها است. به همین دلیل استفاده از ابزارها، تکنیک‌ها، روش‌ها و فعالیت‌های مختلف به منظور ارتقاء بهره‌وری برای پویایی سازمان در جهت رشد و شکوفایی، الزامی است (زلیخایی و همکاران، ۱۳۹۶). در سال‌های اخیر، سیستم تولید به‌هنگام (JIT[1]) با بکارگیری کانبان، جهت افزایش بهره‌وری، مورد توجه بسیاری از مهندسان و مدیران بوده است (الربقی و تیواری، ۲۰۱۶). فلسفه تولید JIT مبتنی بر این فرض است که همزمان با بهبود سطح کیفیت می‌توان سطح موجودی را به حداقل سطح ممکن، (حتی به یک واحد) کاهش داد. تولید JIT باعث کاهش زمان تحویل سفارش به مشتری، افزایش قدرت پاسخگویی و نهایتا افزایش سودآوری می‌شود (مطلبی و زندیه، ۱۳۹۶).

خرابی دارایی‌های عملیاتی همواره اجتناب‌ناپذیر بوده است و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات برای بهبود شرایط دارایی‌ها طراحی شده‌اند. به‌طور کلی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات را می‌توان به نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM[2])، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM[3]) و نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM[4]) طبقه‌بندی کرد. (اسماعیلی و حیدری، ۱۳۹۱).

این پژوهش نتایج یک تحلیل شبیه‌سازی در مورد نحوه ارتقاء محیط کسب و کار با بهبود بهره‌وری و سودآوری با استفاده از استراتژی‌های مناسب نگهداری و تعمیرات در سیستم‌های JIT را ارائه می‌دهد. به‌دلیل پیچیدگی ساختاری موضوع و عدم‌قطعیت پارامترها، تکنیک شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای تخمین واقع‌بینانه معیارها استفاده شد. مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی و مقایسه تاثیرات سیاست‌های نگهداری و تعمیرات بر عملکرد یک خط تولید چند محصولی JIT طراحی شده است.

1- Just In Time
2- Corrective Maintenance
3- Preventive Maintenance
4- Condition Based Maintenance

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

### پیشینه نظری

بهره‌وری ماشین‌آلات خط تولید، با توجه به ضایعات و هزینه‌های ناشی از عدم استفاده از روش‌های مناسب و علمی نگهداری و تعمیرات، ممکن است به شدت کاهش یابد. از این رو، بررسی انواع روش‌های نگهداری و تعمیرات و شناسایی روش‌هایی که اثربخشی تجهیزات را افزایش داده و موجب بهره‌وری می‌شوند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خرابی دارایی‌های عملیاتی امری اجتناب ناپذیر است. اقدامات نگهداری و تعمیرات برای بهبود شرایط دارایی‌ها جهت حفظ آنها در یک حالت کاربردی طراحی شده‌اند. به‌طور کلی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات را می‌توان به نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) و نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM) طبقه‌بندی کرد. سیاست CM وقتی اجرا می‌شود که یکی از دستگاه‌ها به‌طور غیرمنتظره‌ای خراب شوند. در برخی موارد، دارایی ناگهان و بدون هشدار خراب می‌شود پس وجود این سیاست به تنهایی یا به صورت ترکیبی به همراه سایر سیاست‌های نگهداری و تعمیرات الزامی است. PM به منظور به حداقل رساندن تاثیر خرابی برنامه‌ریزی نشده به وسیله برنامه‌ریزی و بررسی‌های دوره‌ای عمل می‌کند (بین و همکاران، ۲۰۱۷). CBM یک استراتژی پیشرفته است که هدف آن اطمینان از انجام مداخلات نگهداری و تعمیرات تنها در زمانی است که بر اساس تجزیه و تحلیل شرایط دارایی مورد نیاز باشد (آیو و سیلرز، ۲۰۱۸). تعداد قابل توجهی از مطالعات موجود در ادبیات، جزئیات مدل‌سازی هر یک از استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات و پیامدهای آنها بر دارایی‌های سیستم را مورد بحث قرار داده‌اند، بااین‌حال، در این مقاله ما یک دید کلی را در نظر می‌گیریم. جدول ۱ نشان می‌دهد که چگونه اقدامات یک استراتژی نگهداری و تعمیرات، ممکن است بر دارایی‌های موجود در سیستم تاثیرگذار باشد، به‌طوری‌که احتمال وقوع تمام حالت‌های خرابی تغییر نکند.

**جدول ۱- تعاملات در میان استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات**

| | CM | PM | CBM |
|---|---|---|---|
| ممکن است بر سایر استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات در همان دارایی تاثیر بگذارد؟ | نه | بله | بله |
| بر سایر استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات سایر دارایی‌ها تاثیر می‌گذارد؟ | بله | نه | نه |

یکی از عواملی که سودآوری خط تولید، به شدت به آن وابسته است، نوع سیستم کنترل تولید کارخانه است. به طور کلی سیستم‌های کنترل تولید، در رابطه با کنترل جریان موجودی از یک ایستگاه کاری به ایستگاه بعدی به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول سیستم‌های کنترل تولید متعارف یا "سیستم کنترل تولید فشاری" است. در این سیستم، پیش‌بینی‌ها براساس سطوح موجودی مواد اولیه یا موجودی در جریان ساخت (WIP[1]) در هر مرحله از تولید با درنظر گرفتن زمان انتظار برای تکمیل سفارش‌ها، و محصولات نیمه تمام انجام می‌شود. فرایند فشار از طریق سطوح موجودی در هر مرحله از سیستم تولید کنترل می‌شود. برای جلوگیری از پیش‌بینی‌های نادرست، سطحی از موجودی مواد اولیه و موجودی در جریان ساخت اغلب به عنوان ذخایر ایمنی انبار می‌شود، که می‌تواند هزینه‌های غیرضروری نگهداری را به همراه داشته باشد (احمد و همکاران، ۲۰۱۷).

برای جلوگیری از نگهداری موجودی اضافی در مراحل تولید، نوع دوم کنترل تولید، به نام "سیستم کنترل JIT" یا "سیستم کنترل تولید کششی" معرفی شده است و توسط بسیاری از شرکت‌ها در سراسر جهان اجرا می‌شود. در این سیستم ، برخلاف سیستم فشاری، از تقاضای پیشبینی شده استفاده نمی‌شود. بلکه با ورود سفارش واقعی مشتری به سیستم، تولید محصول مورد نظر آغاز می‌شود؛ بنابراین، وقتی سفارش وارد سیستم می‌شود، این سفارش به ایستگاه آخر که مربوط به واحد کانبان آخرین مرحله از تولید است، می‌رود (هو، ۲۰۱۱). کانبان، سفارش مورد نیاز خود را از ایستگاه قبلی خود، با آزاد نمودن کارت کانبان درخواست کرده و سپس سرپرست مونتاژ این درخواست را رزرو نموده و پس از تولید، محصول به انبار محصولات نهایی ارسال می‌شود و این روند طی یک حلقه ادامه می‌یابد (مصطفی و همکاران، ۲۰۱۵). اساسا دو نوع کانبان وجود دارد: ۱- کانبان برداشت[2]: این کانبان قطعاتی را که یک ایستگاه باید از ایستگاه قبلی خود دریافت کند را مشخص کرده و بین این دو ایستگاه در جریان است. ۲- کانبان تولید[3]: این کانبان، مشخص می‌کند که چه تعداد قطعه باید به منظور جایگزینی مقادیر برداشت شده، در ایستگاه کاری تولید شود (ساوسار، ۲۰۱۵). در هر مرحله تولید، سطح موجودی به وسیله تعداد کل کانبان‌ها تعیین می‌شود. علاوه بر انواع

1- Work In Process
2- Withdrawal Kanban
3- Production-ordering Kanban

کانبان‌های استفاده شده، سیاست خروج کانبان یکی دیگر از عوامل مهم در بهره‌برداری از سیستم JIT است (مورتون و همکاران، ۲۰۱۵).

عملیات یک سیستم JIT عمدتا به عملکرد و دسترسی منابع بستگی دارد. اثربخشی تجهیزات تولید و سایر منابع در خط تولید با نگهداری و تعمیرات جامع (TPM[1]) که عمدتا بستگی به سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) دارد، بیشتر می‌شود. فعالیت‌های PM باید در هر سطح و هر مرحله از JIT انجام شود تا عملکرد سیستم را ارتقاء دهد (مورتون و همکاران، ۲۰۱۵).

از آنجا که یک برنامه نگهداری و تعمیرات خوب تاثیر قابل توجهی در قابلیت اطمینان و دسترسی یک دستگاه تولیدی دارد، عملکرد سیستم JIT به طور قابل توجهی به آن وابسته است و نیاز شدیدی به تجزیه و تحلیل سیاست‌های نگهداری و تعمیرات برای طراحی سیستم بهتر با عملکرد بهتر وجود دارد. رویکرد پیشنهادی، مدل‌سازی تعاملات در میان استراتژی‌های مختلف نگهداری و تعمیرات و تأثیر آنها بر دارایی‌های سیستم می‌باشد. با توجه به انعطاف‌پذیری شبیه‌سازی گسسته پیشامد، ساخت سیستم‌های مختلف نگهداری و تعمیرات بر اساس مدل‌هایی که در ادبیات ظاهر می‌شوند، فراهم می‌شود.

## پیشینه تجربی

یکی از اهداف اصلی سیستم‌های تولیدی، بهبود بهره‌وری با حفظ دارایی‌ها در حالت عملیاتی آنها است که به شدت به عملکرد نگهداری و تعمیرات بستگی دارد و این موضوع به عنوان یک عنصر موفقیت اساسی در صنعت مدرن تبدیل شده است (بین و همکاران، ۲۰۱۷). افزایش کارایی سیستم‌های نگهداری و تعمیرات از طریق مدل‌سازی و بهینه‌سازی، حجم زیادی از مطالعات منتشر شده را به خود متمرکز کرده است. مدل‌سازی تحلیلی نگهداری و تعمیرات در مدت زمانی طولانی به طور گسترده‌ای توسعه یافته است و تعداد زیادی از مدل‌های بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات را شامل شود (دکر، ۱۹۹۶). به طور کلی، بسیاری از این مدل‌ها برای یک سیستم خاص ایجاد شده‌اند که از یک یا چندین واحد تشکیل شده اند (ون و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال، سیستم‌های نگهداری و تعمیرات در صنعت بسیار پیچیده‌تر است و کاربرد تکنیک‌های

1- Total Productive Maintenance

مدل‌سازی تحلیلی را محدود می‌کند (نوواکوفسکی و وربینکا، ۲۰۰۹ و نیکولای و دکر، ۲۰۰۸).

استفاده از شبیه‌سازی برای مدل‌های نگهداری و تعمیرات در حال افزایش است؛ به کمک شبیه‌سازی قادر به مدل‌سازی رفتارهای پیچیده خواهیم بود و نیاز به پیش فرض‌های کمتری نسبت به مدل‌سازی تحلیلی دارد (شرما و همکاران، ۲۰۱۱). اگرچه شبیه‌سازی به‌طورکلی در زمینه تولید پایه‌گذاری شده است، به نظر می‌رسد هنوز هم برای نگهداری و تعمیرات در حال توسعه است و تعداد کمی از محققان چارچوب مفهومی را برای مدل‌سازی سیستم‌های نگهداری و تعمیرات با استفاده از شبیه‌سازی توسعه داده‌اند (ورینگتون و همکاران، ۲۰۰۲ و دوفا و همکاران، ۲۰۰۱).

عرب و همکاران (۲۰۱۳) برای بررسی امکان‌پذیر بودن افزایش سودآوری یک محیط تولیدی، یک سیستم تولید و نگهداری و تعمیرات را به طور همزمان مدل‌سازی کردند. نتایج بدست آمده از این پژوهش حاکی از آن است که بکارگیری سیستم نگهداری وتعمیرات پیشگیرانه به افزایش زیاد سودآوری منجر می‌شود.

از سوی دیگر، اوریبد و همکاران (۲۰۰۸) پس از بررسی بهره‌وری ماشین‌آلات تولیدی کارخانه‌ها، سیستم نگهداری و تعمیرات نامناسب را مهم‌ترین عامل پایین بودن بهره‌وری شناسایی کردند. آنها از یک ابزار خارجی برای مدل‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات استفاده کرده و از آن به عنوان یک ورودی به مدل DES[1] استفاده کردند. الربقی و همکاران (۲۰۱٦) سطح بهینه سفارش‌دهی قطعات یدکی نگهداری و تعمیرات در یک خط تولید با چهار ایستگاه کاری و تاثیر آن را در سودآوری و بهره‌وری محاسبه کردند اما سایر معیارهای عملکردی و هزینه را مورد بررسی قرار ندادند. همچنین بین و همکاران (۲۰۱۷) بهره‌وری خط تولید را وابسته به نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط معرفی کردند اما سایر سیاست‌های را بررسی نکردند.

با وجود توانایی شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای مدل‌سازی سیستم‌های نگهداری و تعمیرات پیچیده، مطالعات کافی در این زمینه وجود ندارد. همچنین معیارهای هزینه و عملکرد به صورت جامع در این مطالعات بررسی نشده‌اند. مطالعه حاضر با ارائه یک رویکرد مدل‌سازی برای بهینه‌سازی سیستم‌های نگهداری و تعمیرات، سعی دارد تا بخشی از شکاف‌های موجود در ادبیات را پوشش دهد.

---

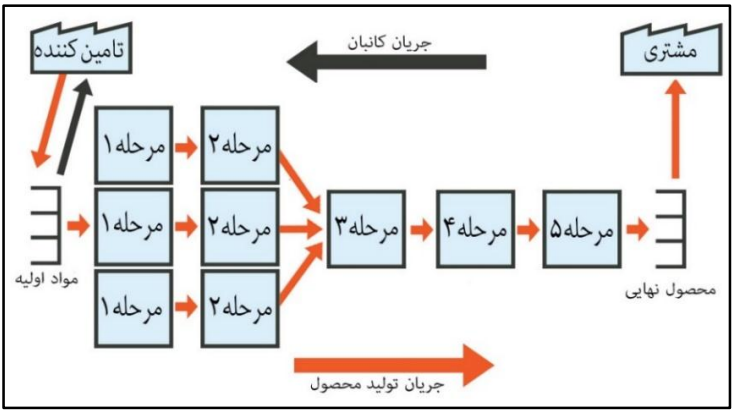
1- Discrete Event Simulation

علاوه بر این سعی داریم از مزایای DES مانند مدل‌سازی سریع و شبیه‌سازی تعاملی بصری بهره ببریم.

در این پژوهش با توجه به مطالعات قبلی، برای بررسی راهکارهای ارتقاء بهره‌وری و سودآوری خط تولید، به بررسی انواع سیستم‌های نگهداری و تعمیرات پرداخته و در نهایت بهترین سیاست نگهداری و تعمیرات را برای کارخانه‌های تولیدی معرفی می‌کنیم.

**مدل مفهومی**

سیستم کنترل تولید JIT، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک تکنیک زمان‌بندی کششی بر اساس استفاده از سیستم کانبان است. در خط تولید مورد بررسی ما، ۵ ایستگاه کاری مستقل وجود دارد. مدل شبیه‌سازی برای این خط تولید چند مرحله‌ای JIT توسعه داده شد.




**شکل ۱- سیستم تولید JIT تحت کنترل کانبان**

وقتی محصول نهایی (یک پالت از محصولات) از خروجی آخرین مرحله (n) خارج می‌شود (از سیستم حذف می‌شود)، کانبان سفارش تولید، که یک کارت جریان اطلاعات است، در خروجی مرحله n نوشته می‌شود و این سیگنالی است برای اینکه محصول خارج شده از سیستم، جایگزین شود. کانبان برداشت به خروجی مرحله n-1 منتقل می‌شود تا با کانبان سفارش تولید جایگزین شود و این کانبان مواد لازم برای تولید در مرحله n را فراهم می‌کند. این فرآیند در تمام مراحل تکرار می‌شود، به طوری که همواره تولید در یک مرحله با توجه به تقاضای مرحله بعد انجام می‌شود.

نخستین گام این مسئله، مدلسازی سیستم خط تولید JIT است. سپس بعد از اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شده و کارخانه اصلی می‌توانیم سیستم نگهداری و تعمیرات را در مدل پیاده‌سازی و ارزیابی کنیم. روابط برای سیستم تولید اینگونه تعریف می‌شوند:

$$LT^{۱} = ODD^{۲} - (PTMP^{۳} + PTFP^{٤} + TQCTT^{٥}) \quad (۱)$$

LT: زمان انتظار برای تکمیل سفارش‌ها، ODD: موعد مقرر تحویل سفارش، PTMP: مدت‌زمان تولید محصول میانی، PTFP: مدت‌زمان تولید محصول نهایی، TQCTT: مدت‌زمان بررسی کنترل کیفیت.

$$NIH^{٦} = TPW^{٧} + TPQCT^{٨} + PP^{٩} \quad (۲)$$

NIH: موجودی خالص دردسترس، TPW: موجودی خالص در انبار، TPQCT: محصولات در مرحله کنترل کیفیت، PP: سفارش‌های در حال تولید.

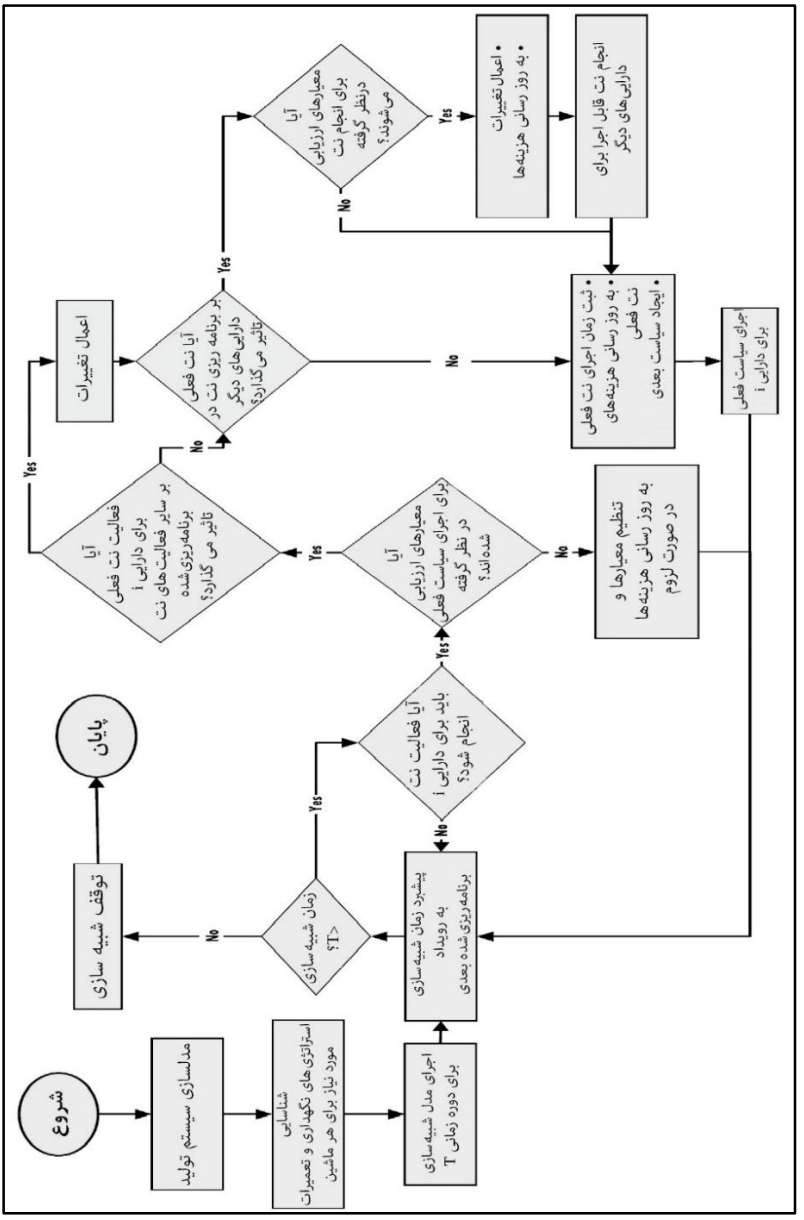
$$TC^{۱۰}=MAC^{۱۱}+SC^{۱۲}+WHC^{۱۳}+MTC^{۱٤} \quad (۳)$$

TC: هزینه کل، MAC: هزینه‌های موجودی، SC: هزینه‌های راه‌اندازی، WHC: هزینه‌های انبارداری، MTC: کل هزینه‌های نگهداری و تعمیرات.

یک‌رویکرد کلی عمومی برای شبیه‌سازی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات در شکل۲ ارائه شده است.

---

1- Lead Time
2- Order Due Date
3- Production Time of Middle Product
4- Production Time of Final Product
5- Total QC Test Time
6- Net Inventory on Hand
7- Total Product in The Warahous
8- Total Product Under QC Test
9- Product in Progress
10- Total Cost
11- Material Cost
12- Setup Cost
13- Warehousing Cost
14- Maintenance total Cost




**شکل ۲- یک رویکرد عمومی برای شبیه‌سازی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات**

رویکرد زیر برای تعریف زمان بین شکست‌ها استفاده شده است:

زمان بین شکست‌ها دارای توزیع یکنواخت است، برای تعریف این توزیع، t، در فاصله ۰<t <b قرار می‌گیرد، و تابع توزیع احتمال به این صورت است:

$$f(t) = 1/b,\ c = 1/b \qquad (٤)$$

قابلیت اطمینان: $R(t) = 1–ct$ (۵)

نرخ شکست: $h(t) = f(t)/R(t) = c/(1–ct)$ (٦)

نرخ شکست $h(t)$ می‌تواند شامل دو بخش در نظر گرفته شود، بخش اول نرخ شکست ناشی از شکست‌های تصادفی $h_1(t)$ و دوم نرخ شکست ناشی از فرسوده شدن $h_2(t)$ .

$h_1(t) = c$ (۷)

$h_2(t) = c^2\, t /(1-ct)$ (۸)

$h(t) = h_1(t) + h_2(t) = c/(1-ct)$

زمان مربوط به توابع چگالی احتمال شکست برای هر $h(t)$، به این صورت خواهد بود:

$f_1(t) = c*e^{(-ct)},\ 0 < t < b$ (۹)

$f_2(t) = c^2*t*e^{(ct)},\ 0 < t < b$ (۱۰)

عملکرد قابلیت اطمینان برای هر جزء به شرح زیر است:

$R_1(t) = e^{(-ct)},\ 0 < t < b$ (۱۱)

$R_2(t) = (1–ct)*e^{(ct)},\ 0 < t < b$ (۱۲)

$R(t) = R_1(t)*R_2(t)$ (۱۳)

دلیل استفاده از توزیع یکنواخت برای زمان بین شکست‌ها این است که هنگامی که نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) پیاده‌سازی می‌شود، خرابی‌های ناشی از فرسودگی از بین می‌رود و در نتیجه نرخ شکست تنها ناشی از شکست ماشین به صورت تصادفی و بر اساس توزیع نمایی خواهد بود (رابطه٦). بنابراین در این مورد نمونه‌برداری برای زمان شکست در شبیه‌سازی براساس توزیع نمایی با میانگین b و نرخ شکست ثابت c است.

در مواردی که تنها CM پیاده‌سازی می‌شود، علاوه بر شکست‌های تصادفی، فرسودگی نیز وجود دارد و بنابراین زمان بین خرابی‌های تجهیزات به صورت یکنواخت بین صفر و b توزیع شده است که توسط رابطه ۱ نشان داده شده است. هنگامی که t=0 است، شکست تنها به صورت تصادفی و با نرخ شکست ثابت برابر با c=1/b است. همان‌طور که دستگاه به کارش ادامه می‌دهد، شکست در اثر فرسودگی هم اتفاق می‌افتد و در

نتیجه، نرخ شکست کل h(t) با زمان t افزایش می‌یابد. بنابراین نمونه‌برداری زمان بین شکست در شبیه‌سازی براساس توزیع یکنواخت با میانگین b/2 و نرخ شکست h(t) است که در رابطه ۳ نشان داده شد.

سیاست ذخیره‌سازی قطعات یدکی دارای یک توزیع پیوسته و شامل (s, Q) است. وقتیکه سطح موجودی قطعات یدکی به یک حد از قبل تعیین شده‌ای برسد، سفارش خرید مجدد قطعات انجام می‌شود. این فرایند از توزیع یکنواخت (۱۸۷, ۸۳) پیروی می‌کند. پارامترهای سیاست قطعات یدکی برای هر ماشین، یعنی s و Q نیز به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شوند.

به حداقل رساندن هزینه‌ها و به حداکثر رساندن دسترسی به ماشین‌آلات در این مدل در نظر گرفته می‌شود. عدم دسترسی به ماشین‌ها می‌تواند هزینه‌هایی به همراه داشته باشد که در عملکرد خط تولید اثرگذار باشد. هزینه‌ای که قطعات یدکی برای سیستم به همراه دارند شامل هزینه نگهداری آنها و هزینه سفارش مجدد خواهد بود که بخشی از عملکرد هزینه را به خود اختصاص می‌دهد. علاوه‌براین، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات CM، PM و CBM با جزئیات محاسبه شده و به تابع هزینه افزوده می‌شود. همچنین هزینه‌های راه‌اندازی مجدد دستگاه‌ها پس از انجام فعالیت نت، حائز اهمیت است.

$$MTC^{1} = MC^{2} + SPC^{3} + UC^{4} + SC^{5} \quad (14)$$

$$MC = PMC^{6} + CMC^{7} + CBMC^{8} \quad (15)$$

$$SPC = OC^{9} + HC^{10} \quad (16)$$

1- Maintenance Total Cost
2- Maintenance cost
3- Spare parts cost
4- Unavailability cost
5- Setup Cost
6- PM cost
7- CM cost
8- CM cost
9- Order cost
10- Holding cost

TC= هزینه کل نگهداری و تعمیرات، MC= هزینه نگهداری و تعمیرات، SPC= هزینه قطعات یدکی، UC= هزینه در دسترس نبودن ماشین‌ها در هنگام نگهداری و تعمیرات، SC= هزینه راه‌اندازی، PMC= هزینه‌های نگهداری و تعمیرات PM، CMC= هزینه‌های نگهداری و تعمیراتCM، CBMC= هزینه‌های نگهداری و تعمیرات CBM، OC= هزینه سفارش مجدد قطعات یدکی، HC=هزینه نگهداری قطعات یدکی.

## روش شناسی پژوهش

به‌دلیل پیچیدگی ساختاری مدل و عدم‌قطعیت پارامترها از شبیه‌سازی گسسته پیشامد و برای اجرای آزمایش‌های شبیه‌سازی از داده‌های کارخانه موردمطالعه (شرکت شیمیایی بهداد) استفاده می‌شود.

### شبیه‌سازی

شبیه‌سازی مجموعه‌ای از روش‌ها برای تقلید رفتار یک سیستم واقعی با کمک رایانه است و هدف آن تحلیل و بررسی عملکرد سیستم تحت‌مطالعه و ایجاد بهبود در آن و یا انجام پیش‌بینی‌ها است (چانگ، ۲۰۰۳). می‌توان از شبیه‌سازی به منظور تعیین پارامترهای بحرانی برای ارزیابی مسائل مختلف یک سیستم، با حداقل خطای ممکن استفاده کرد (داوودی و همکاران، ۲۰۱۵). امروزه شبیه‌سازی در گستره زیادی از علوم کاربرد دارد و با توجه به قدرت و محبوبیتی که دارد، باعث شده است تا نرم‌افزارهای بسیار کارآمدی در این زمینه تولید شود (عظیمی و همکاران، ۱۳۹٤).

### شبیه‌سازی گسسته پیشامد

اصطلاح DES به یک روش مدل‌سازی اشاره دارد که تغییرات حالت‌های سیستم را نشان می‌دهد. در این روش اساسا، یک صف از رویدادها ایجاد می‌شود که بر وضعیت سیستم تأثیر می‌گذارند. این رویدادها براساس زمان‌بندی مرتب شده و سپس تغییرات را در سیستم بدون تغییر زمان بین دو رویداد اعمال می‌کنند. نمونه‌هایی از چنین تغییراتی در یک سیستم تولید معمول، شامل ورود یک قطعه، شروع و پایان زمان چرخه ماشین‌آلات و وقوع خرابی‌ها و شکست‌ها است (ساوسار، ۲۰۱۵).

**نرم‌افزار ED[1]**

نرم‌افزار ED کامل‌ترین و پرسرعت‌ترین نرم‌افزار شبیه‌سازی گسسته پیشامد است که در سال ۲۰۰۳ توسط شرکت هلندی «ISS[2]» معرفی شد. محیط و ابزارهای طراحی‌شده در این نرم‌افزار، مدت‌زمان لازم برای ساخت مدل‌های شبیه‌سازی گسسته و پیچیده را نسبت به رقبای خود تا حد بسیار زیادی کاهش می‌دهد.

**انجام پروژه شبیه‌سازی**

هدف این پژوهش ارتقاء محیط کسب و کار با بهبود بهره‌وری و سودآوری خط تولید با انتخاب سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات در کارخانه‌هایی با تولید JIT با حداقل هزینه‌ها و حداکثر سطح دسترسی به تجهیزات است. به این منظور عملکرد سیاست‌های CM، PM و CBM را مورد ارزیابی قرار دادیم.

**فرضیات مدل.** خط تولیدی که در این مطالعه برای تحلیل تاثیرات سیاست‌های نگهداری و تعمیرات بر بهره‌وری و سودآوری خط تولید بررسی شده است، دارای ویژگی‌های عملیاتی زیر است:

- پنج مرحله یا ایستگاه کاری در این خط تولید وجود دارد.
- تعداد کانبان‌های تولید و برداشت برابر بوده و از ۱عدد تا ٤عدد متغیر است.
- چهار حالت در رابطه با نگهداری و تعمیرات با توجه به قابلیت اطمینان دستگاه‌ها در نظر گرفته می‌شود:

– حالت۱. تجهیزات کاملا قابل اعتماد "بدون شکست" هستند و در نتیجه هیچ نگهداری و تعمیراتی برای آنها درنظر گرفته نمی‌شود.

– حالت۲. تجهیزات دائما در معرض خرابی و دارای نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM[3]) هستند، که به صورت برنامه‌ریزی نشده و در مواقع مورد نیاز انجام می‌شود، اما نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM[4]) یا نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت (CBM[5]) انجام نمی‌شود.

1- Enterprise Dynamics
2- Incontrol Simulation Solutions
3- Corrective Maintenance
4- Preventive Maintenance
5- Condition Based Maintenance

– حالت۳. تجهیزات در معرض خرابی قرار دارند و سیاست PM برای پیشگیری از شکست و CM انجام عملیات اصلاحی در صورت بروز شکست ناگهانی درنظر گرفته می‌شوند.
– حالت٤. تجهیزات در معرض خرابی قرار دارند و دو نوع نگهداری و تعمیرات CBMو CM درنظر گرفته می‌شوند.

- متوسط زمان بین دو شکست (MTBF[1]) متغیر است و اثرات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ارزیابی شده است.
- چهار شاخص عملکردی مورد مطالعه قرار گرفته است:

– متوسط نرخ تولید سالانه؛
– متوسط بهره‌وری تجهیزات؛
– متوسط موجودی در جریان ساخت.
– سود خالص

- پارامترهای زیر برای خط تولید فرض شده است:

– متوسط زمان بین دو شکست (MTBF) برای همه تجهیزات از توزیع یکنواخت بین ۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ دقیقه پیروی می‌کند.
– زمان انجام تعمیرات CM دارای توزیع نرمال با میانگین ۱۵۰ دقیقه و انحراف استاندارد ۲۰ دقیقه برای برای تمام تجهیزات است.
– نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) بر روی تمام تجهیزات در ابتدای هر شیفت کاری (هر٤٨٠ دقیقه) انجام می‌شود که شامل تمیز کردن رآکتورها، تنظیم دستگاه‌ها و روانکاری و تغییر ابزارها در صورت نیاز است و زمان انجام آن دارای توزیع یکنواخت ۱۳ تا ۱۸ دقیقه می‌باشد.
– نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت (CBM) بر روی تمام تجهیزات هر ٦٠ دقیقه انجام می‌شود و علائم حیاتی تجهیزات همچون فشار، دما، ارتعاش و ... کنترل شده و به محض تغییر سیگنال‌ها و خروج از محدوه مجاز، سیستم بصورت خودکار دستورات لازم را می‌دهد. زمان انجام CBM دارای توزیع یکنواخت ٦ تا ٨ دقیقه می‌باشد.

1- Mean Time Between Failures

- نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM) به محض اینکه شکست اتفاق بیفتد، با حذف محصولات نیم‌ساخته از دستگاه شروع به کار می‌کند و تولید این محصولات، بعد از انجام عملیات تعمیرات انجام می‌شود.
- نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) زمانی انجام می‌شود که دستگاه خالی از محصول باشد و هیچ مانعی برای انجام PM وجود نداشته باشد.
- نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت (CBM) در هنگام انجام عملیات تولید انجام می‌شود و هیچگونه اخلالی در روند تولید ایجاد نخواهد کرد.
- در PM مبتنی بر زمان، نگهداری و تعمیرات دارایی به صورت دوره‌ای انجام می‌شود تا خرابی‌های غیر منتظره کاهش یابد.
- به دلیل اینکه خرابی دارایی‌ها غیرقابل پیش‌بینی است، دو سیاست CM به عنوان استراتژی نگهداری و تعمیرات احتمالی برای همه تجهیزات تعریف می‌شود.
- متغیرهای مرتبط با CM: METBF، زمان تعمیر و هزینه‌های CM
- متغیرهای مربوط به PM: فرکانس PM، زمان تعمیر و هزینه‌های PM
- متغیرهای مربوط به CBM: فرکانس بازرسی، هزینه‌های بازرسی، آستانه CBM، زمان تعمیر CBM و هزینه‌های CBM

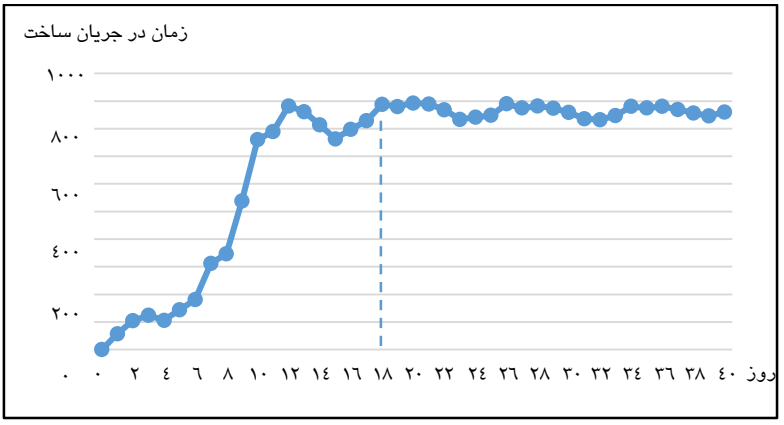
برای جمع‌آوری داده‌های موردنیاز این پژوهش از اطلاعات خط تولید ۵ سال (فروردین ۱۳۹۰ تا اسفند ۱۳۹٤) «شرکت شیمیایی بهداد» استفاده شد. اطلاعات ورودی مدل برای شبیه‌سازی سیستم تولید کارخانه، شامل میزان تولید و فروش ماهانه و هفتگی هر محصول، توابع توزیع فعالیت‌های تولید، ترکیب شیمیایی محصولات میانی و نهایی، ظرفیت انبارها و مخازن ذخیره‌سازی است که در مدل شبیه‌سازی به‌کار رفته است. سپس برای بررسی سیستم نگهداری و تعمیرات در این کارخانه، اطلاعات نگهداری و تعمیرات (شامل توابع توزیع فعالیت‌های نت، هزینه‌های هر سیاست نت و مشخصات دستگاه‌ها) نیز به مدل اضافه شد.

برای اجرای یک مدل شبیه‌سازی، وجود داده‌ها و اطلاعات موردنیاز به‌صورت توزیع‌های آماری ضروری است؛ بنابراین زمان‌های ثبت‌شده فعالیت‌های تولید و نگهداری و تعمیرات کارخانه، توسط نرم‌افزار EasyFit به‌صورت توزیع‌های آماری برحسب دقیقه به‌دست آمد.

با درنظرگرفتن محدودیت‌های فیزیکی سیستم، جزئیات فرآیندها و مشخصات عملیاتی سیستم با استفاده از امکانات مدل و به‌کارگیری اتم‌های دردسترس، مسئله در نرم‌افزار ED مدل‌سازی شد. با توجه به اینکه سیستم فعلی کارخانه موردمطالعه، JIT نیست، ابتدا مدل شبیه‌سازی سیستم موجود کارخانه طراحی و اجرا شده و پس از بررسی صحت و اعتبار مدل، به طراحی مشخصه‌های سیستم JIT برای تغییر سیستم موجود پرداخته شد.

به‌دلیل اینکه مدل شبیه‌سازی ساخته‌شده توسط تحلیل‌گر، شرایط ابتدایی، مشابه آنچه در یک خط تولید واقعی در حال اجرا است را ندارد، زمان مشخصی برای گرم‌شدن سیستم تعیین می‌شود. برای محاسبه زمان گرم‌شدن توصیه می‌شود تا نموداری خاص ترسیم شده و زمان تقریبی گرم‌شدن از روی این نمودار مشخص شود. منظور از زمان گرم‌شدن سیستم، مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا یک سیستم به حالت نسبتاً پایدار برسد (عظیمی و همکاران، ۱۳۹٤).

برای این مسئله در محور افقی «زمان» و در محور عمودی «زمان در جریان ساخت» (ثبت‌شده توسط نرم‌افزار پس از ۳۰ بار اجرای مدل) قرار گرفت و نمودار ترسیم شد. زمان گرم‌شدن سیستم، ۱۸ روز تخمین زده شد (شکل ۳).




**شکل ۳- نمودار زمان گرم‌شدن سیستم**

طول دوره اجرای شبیه‌سازی، به‌استثنای زمان گرم‌شدن سیستم، یک سال درنظر گرفته شد؛ زیرا معیارهای تصمیم‌گیری بر اساس هزینه‌های سالانه است. تعداد اجرای فرآیند شبیه‌سازی برای هر سناریو ۳۰ بار است.

برای اطمینان از اجرای صحیح مدل به‌طوری‌که تمام اجزای ضروری سیستم را دارا باشد، فرآیند بررسی صحت مدل انجام می‌شود و به‌منظور کسب اطمینان از اینکه مدل ساخته‌شده با سطح قابل‌قبولی، ارائه‌دهنده سیستم واقعی باشد، فرآیند اعتبارسنجی صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار ED انجام می‌پذیرد و این نرم‌افزار از ابزارهای شبیه‌سازی و محیط سه‌بُعدی بهره می‌برد، می‌توان اطمینان مناسبی از صحت مدل کسب کرد؛ به‌علاوه در مدل‌سازی هر مرحله از زیر سیستم‌های کارخانه، تلاش بر این بوده که خروجی‌ها با محیط واقعی متناسب باشد و فرآیند معتبرسازی به‌طور پیوسته انجام شده است. به‌منظور اطمینان کامل از اعتبار مدل در این قسمت، مجموعه داده‌های مدل و سیستم واقعی با یکدیگر مقایسه شد. نخست باید مشخص شود که آیا دو مجموعه از داده‌ها، دارای توزیع نرمال هستند یا خیر؟ به این منظور از آزمون کولموگروف ـ اسمیرنوف استفاده شد (جدول ۲).

**جدول ۲- نتایج آزمون کولموگروف ـ اسمیرنوف**

| | Statistic | Df | Sig. |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۰/۳۱۵ | ٤٤٨٦٦ | ۰/۵۳۳ |
| ۲ | ۰/۲۲۷ | ٤٤٨٤٨ | ۰/۵۵۵ |

با توجه به اینکه میزان sig بیشتر از ۰/۰۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که توزیع داده‌ها نرمال است. قدم بعدی مشخص‌کردن مشابه‌بودن واریانس و میانگین دو مجموعه داده‌ها است. با توجه به نتایج آزمون F (جدول ۳) ، مقدار .sig بیشتر از ۰/۰۵ است؛ بنابراین می‌توان با اطمینان ۹۵ درصد ادعا کرد که دو مجموعه داده‌ها، واریانس‌های یکسان دارند و با توجه به نتایج آزمون T (جدول ٤) بین میانگین دو مجموعه داده‌ها تفاوت معناداری مشاهده نمی‌شود.

**جدول۳- نتایج تحلیل واریانس و آزمون F**

| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Between Groups | ٤٢٧٥٦٥ | ۱ | ٤٢٧٥٦٥/۱۱۵ | ۱/۱۸۲ | ۰/۲۷۷ |
| Within Groups | ۱۱۷۷۱۲۸۲۲٦٤ | ۳۲۵۵٤ | ۳٦۱۵۹۲/۵۰۱ | | |
| Total | ۱۱۷۷۱۷۰۹۸۳۰ | ۳۲۵۵۵ | | | |

**جدول۴- نتایج آزمون T**

| | N | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱٦۱۱۰ | ۱۰۰۵ | ٦۰۱ | ٤/۷۳۹۰۲ |
| ۲ | ۱٦٤٤٦ | ۱۰۱۳ | ٦۰۱ | ٤/٦۸۷٦٦ |

جدول ۵- آزمون معناداری T

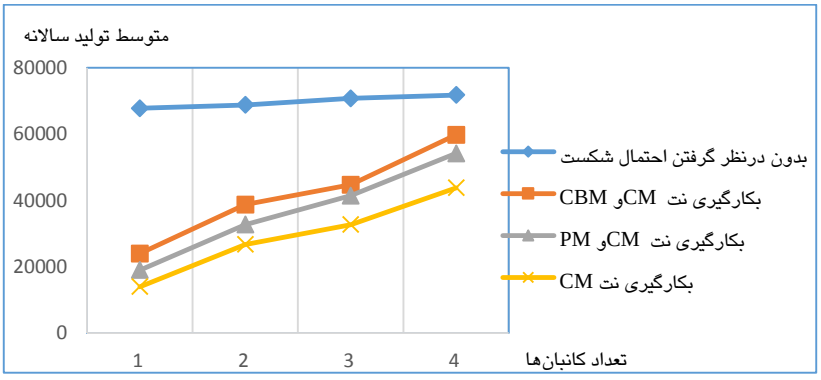
| | Levene's Test for Equality of Variances | | t-test for Equality of Means | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | F | Sig. | t | Df | Sig. (2-tailed) |
| Equal variances assumed | ۷/۱۱۹ | ۰/۰۸ | -۱/۰۸۷ | ۳۲۵۵٤ | ۰/۲۷۷ |
| Equal variances not assumed | | | -۱/۰۸۷ | ۳۲۵۳۹ | ۰/۲۷۷ |

جدول ۵، نشان می‌دهد که تفاوت معناداری بین میانگین دو نمونه وجود ندارد (سطح معناداری بیشتر از ۰/۰۵ است)؛ درنتیجه با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان ادعا کرد که اختلاف آماری معنادارای بین سیستم واقعی و مدل شبیه‌سازی وجود ندارد و مدل ساخته‌شده معتبر است. پس از سنجش صحت و اعتبار مدل، می‌توان سناریوهای مختلف را در این سیستم بررسی کرد.

## تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

### تعیین کانبان‌ها

برای شبیه‌سازی سیستم JIT و بررسی سناریوهای مختلف، ابتدا لازم است تعداد بهینه کانبان برای این خط تولید تعیین شود. به این منظور مدل را با تعداد مختلف کانبان‌های مجاز اجرا کردیم و متوسط تولید سالانه به عنوان معیار ارزیابی ثبت شد. با توجه به شکل٤، بهترین تعداد کانبان، ٤عدد است و سیستم به طور کامل در این سطح ثبات می‌یابد.



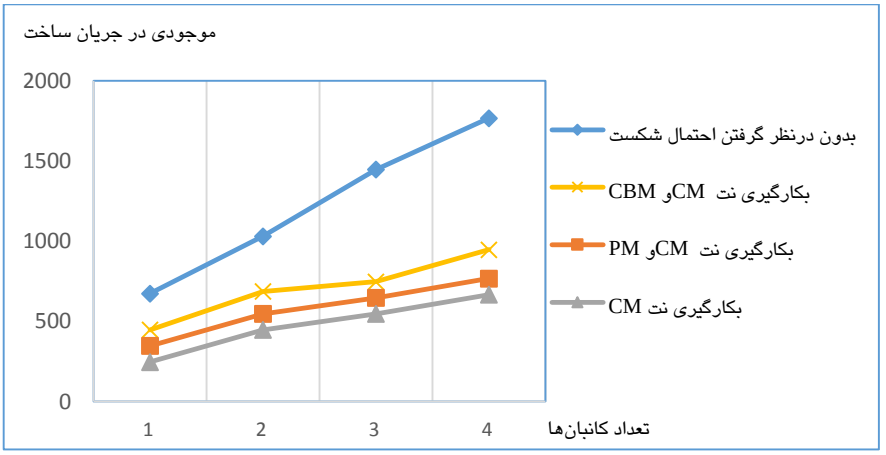

شکل ۴- تاثیر تعداد کانبان‌ها و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات بر میزان تولید

در شکل٤ تغییرات میزان تولید سالانه تحت تاثیر بکارگیری سیاست‌های مختلف نگهداری و تعمیرات نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید، میزان توان

تولید سالانه در تمام سطوح کانبان، زمانی که تمام تجهیزات به طور کامل قابل اعتماد و دارای نرخ شکست صفر هستند در بیشترین مقدار قرار دارد. زمانی که هیچ نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه‌ای برای ماشین‌آلات وجود ندارد، سرعت تولید بسیار کاهش می‌یابد. و با پیاده‌سازی سیستم PM و CBM، میزان تولید سالانه در تمام سطوح کانبان افزایش می‌یابد.

### سناریوی ۱: بررسی تغییرات میانگین موجودی در جریان ساخت

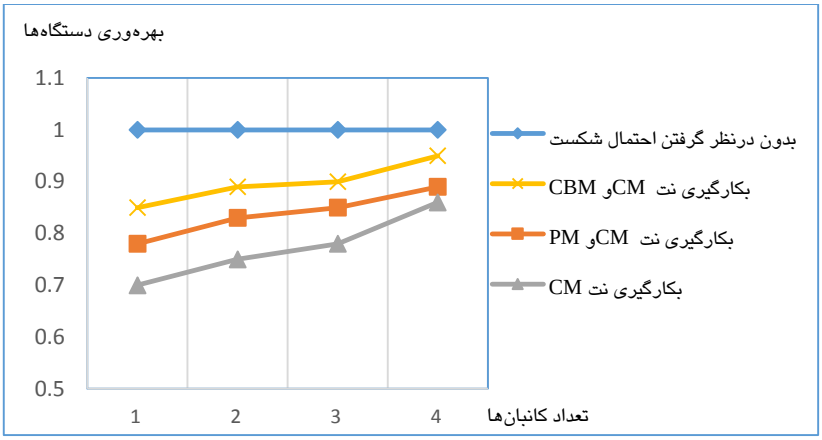
همانطورکه در شکل ٥ نشان داده شده است، بالاترین مقدار موجودی در جریان ساخت زمانی خواهد بود که هیچ احتمال خرابی برای ماشین‌آلات درنظر نمی‌گیریم و پایین‌ترین سطح زمانی است که تنها سیاست CM معرفی شده است. مقدار موجودی در جریان ساخت با افزایش تعداد کانبان‌ها، بیشتر خواهد شد. افزودن سیاست PM یا CBM به سیستم، به طور قابل توجهی بر سطح موجودی در جریان ساخت تاثیر نمی‌گذارد.




**شکل ۵- تاثیر تعداد کانبان‌ها و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات بر میانگین سطح موجودی درجریان ساخت**

### سناریوی ۲: بررسی بهره‌وری ماشین‌آلات

باتوجه به شکل ٦، اگر تنها CM در سیستم معرفی شده باشد، بهره‌وری ماشین‌آلات کاهش می‌یابد. افزایش تعداد کانبان‌ها تا حدودی بر بهره‌وری ماشین‌آلات تاثیر دارد و تفاوت بین سیاست‌های نگهداری و تعمیرات مختلف را کاهش می‌دهد.

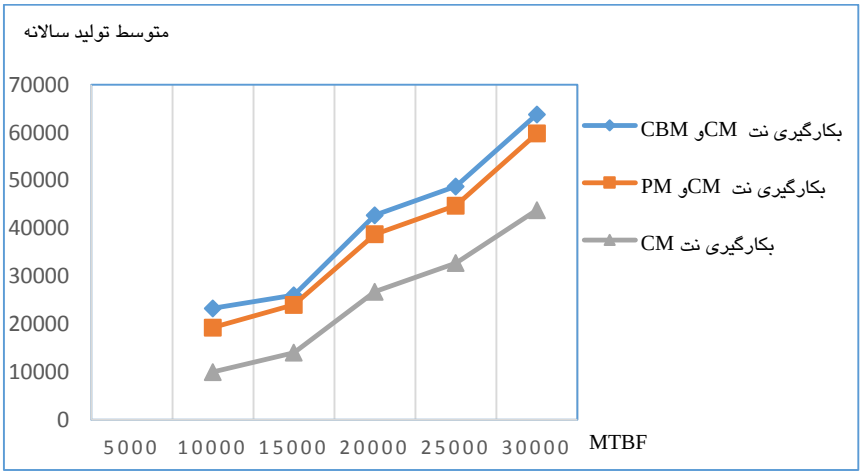



**شکل ۶- تاثیر تعداد کانبان‌ها و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات بر بهره‌وری دستگاه‌ها**

با توجه به نتایج بدست آمده، در سناریوهای بعدی، اثرات تغییر متوسط زمان بین دو شکست (MTBF) را بر معیارهای عملکرد بررسی می‌کنیم.

### سناریوی ۳: بررسی تاثیر MTBF بر متوسط تولید سالانه

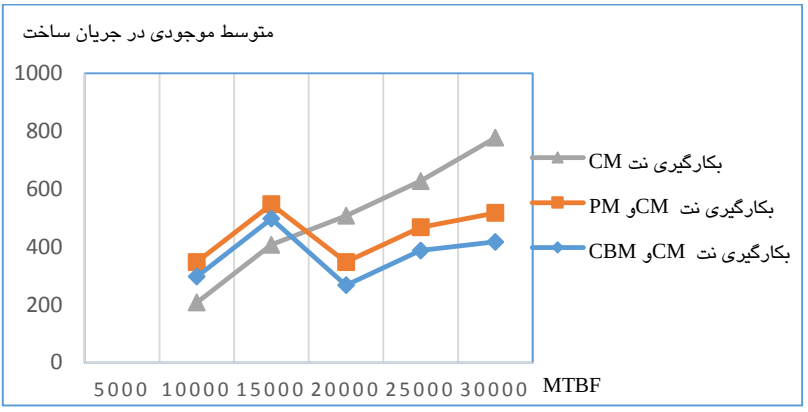
همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، زمانی که CBM و یا PM در سیستم اجرا می‌شود، میزان بالای نرخ تولید در تمام سطوح MTBF وجود دارد. هنگامی که MTBF افزایش می‌یابد، نرخ تولید نیز همانطور که انتظار می‌رود افزایش می‌یابد. با این حال، این افزایش در هنگام اجرای CBM و PM بسیار بالاتر از اجرای CM به تنهایی است.




**شکل ۷- تاثیر تغییر MTBF بر تولید سالانه**

**سناریوی ۴: بررسی تاثیر تغییر MTBF بر متوسط موجودی در جریان ساخت**

باتوجه به شکل ۸، متوسط موجودی در جریان ساخت، یک الگوی تصادفی را نشان می‌دهد؛ برای مقادیر کمتر از ۱۵۰۰ دقیقه برای MTBF، سیاست CM به تنهایی بهتر عمل می‌کند اما، با افزایش MTBF به بیش از ۱۵۰۰ دقیقه، معرفی سیاست CBM و PM به سیستم موجب کاهش کلی موجودی درجریان ساخت نسبت به سیاست CM می‌شود.




**شکل ۸- تاثیر تغییر MTBF بر متوسط موجودی در جریان ساخت**

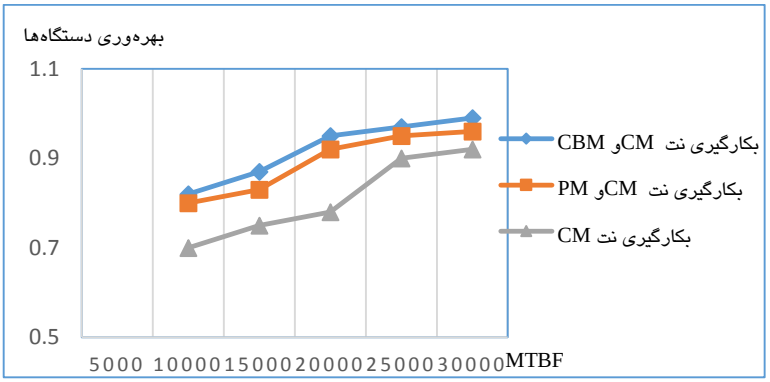
**سناریوی ۵: بررسی تاثیر MTBF در بهره‌وری ماشین‌آلات**

باتوجه به شکل ۹، بهره وری دستگاه‌ها زمانی که علاوه بر CM، PM یا CBM معرفی شوند بسیار بهبود پیدا می‌کند. همچنین همانطور که می‌توان متصور شد، با افزایش MTBF، بهره‌وری دستگاه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش نرخ تولید نیز تقریبا خطی و ثابت بود.

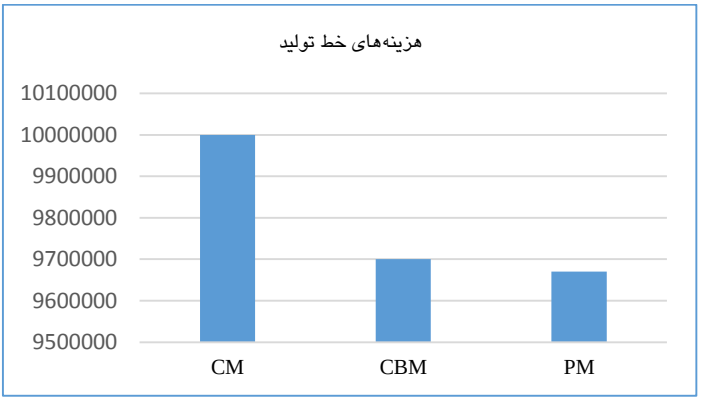
**سناریوی ۶: بررسی هزینه‌ها**

طبق نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مدل‌ها و ثبت اطلاعات، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بکارگیری سیاست‌های نت پیشگیرانه و مبتنی بر شرایط باعث افزایش قابل‌توجهی در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات شامل هزینه‌های تامین قطعات یدکی، هزینه‌های راه‌اندازی پس از اجرای عملیات نت، هزینه‌های سفارش مجدد قطعات یدکی و هزینه‌های نگهداری قطعات یدکی می‌شود؛ اما فاکتور مهم دیگری که در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات باید محاسبه گردد و در رابطه ۱۱ بیان شد "هزینه در دسترس نبودن

دستگاه‌ها در هنگام انجام عملیات نگهداری و تعمیرات" است. این هزینه با محاسبه زمان از دسترس خارج شدن دستگاه‌ها و محاسبه میزان تولید ممکن در این زمان و سپس محاسبه سود احتمالی، حساب شد. کاهش این نوع از هزینه برای سیاست‌های PM و CBM نسبت به سیاست CM، باعث می‌شود که این دو سیاست دارای توجیه اقتصادی نیز باشند (شکل ۱۰).




**شکل۹- تاثیر تغییر MTBF بر بهره وری دستگاه‌ها**

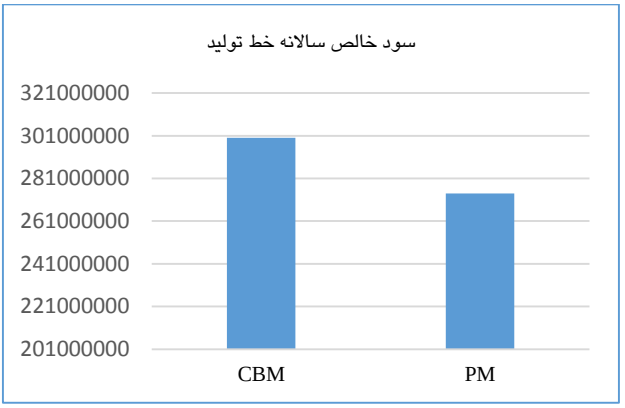



**شکل۱۰- تاثیر بکارگیری سیاست‌های مختلف نت در هزینه‌ها**

## تفسیر نتایج

پس از اجرا و تحلیل سناریوهای مختلفی که در رابطه با سیاست‌های نگهداری و تعمیرات انجام شد، مشاهده می‌شود وجود سیاست‌های PM یا CBM در کنار سیاست CM هم از نظر توان خط تولید و بهره‌وری دستگاه‌های تولیدی و هم از نظر هزینه‌های نگهداری و تعمیرات باعث بهبود شرایط کسب و کار کارخانه می‌شود.

با توجه به اینکه سیاست نت CBM از نظر معیارهایی مثل افزایش بهره‌وری دستگاه‌ها و متوسط تولید سالانه بهتر از PM بوده و از نظر هزینه‌های نگهداری و تعمیرات ضعیف‌تر از PM عمل می‌کند، لذا تصمیم‌گیری بین این دو سیاست مشکل خواهد بود. به همین دلیل سودآوری خط تولید را برای سیاست‌های PM و CBM محاسبه می‌کنیم (شکل ۱۱).




**شکل ۱۱- مقایسه سود خالص سالانه**

این نتایج اهمیت معرفی نت پیشگیرانه و مبتنی بر شرایط در یک سیستم JIT را به منظور افزایش عملکرد آن نشان می‌دهد. با توجه به نتایج خروجی نرم‌افزار، در نهایت برای این خط تولید JIT با ۵ ایستگاه کاری، سیاست نگهداری و تعمیرات CBM مناسب‌ترین گزینه برای اجرا می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شد تا با ارائه یک مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد، با بررسی معیارهای عملکردی و هزینه، افزایش بهره‌وری و سودآوری خط تولید را با استفاده از سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات بررسی کنیم. با استفاده از نرم‌افزار ED، سه سیاست نگهداری و تعمیرات (CM، PM و CBM) شبیه‌سازی شد. برای اجرای مدل، داده‌های مربوط به سیستم تولید و نت «کارخانه شیمیایی بهداد» به‌کار رفت و نتایج نشان داد که معیارهای عملکرد بهره‌وری و سودآوری سیستم‌های JIT، بسیار تحت تاثیر خرابی (شکست) دستگاه‌ها و ماشین‌های تولید قرار دارد. بنابراین، استفاده از

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM) و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) در این سیستم‌ها اجتناب ناپذیر است.

همچنین مشخص شد که راه‌اندازی سیستم نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM) و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)، در کنار نگهداری و تعمیرات اصلاحی (CM)، تأثیر زیادی در بهبود معیارهای عملکرد تمام سطوح کانبان در سیستم‌های JIT و افزایش زمان بین شکست‌ها و کاهش هزینه‌ها دارد.

نتایج این پژوهش، نتایج مطالعات پیشین عرب و همکاران، اوریبد و همکاران و الربقی و همکاران را توجیه کرده و با توجه به شبیه‌سازی سه سیاست قابل‌اجرای پرکاربرد در تولید JIT و درنظرگرفتن تمامی معیارهای عملکردی و هزینه و سود و مقایسه سیاست‌های CBM و PM نتایج مطالعات پیشین را تکمیل نیز می‌کند.

پیشنهاد می‌شود در جهت تکمیل نتایج این پژوهش، همزمان با بهره‌وری ماشین‌آلات خط تولید، بهره‌وری کارکنان خط تولید هم بررسی و تاثیر آن در سودآوری بررسی شود. همچنین علاوه بر سیستم تولید JIT، می‌توان بررسی‌ها را در سایر سیستم‌های تولیدی نیز انجام داد.

## منابع و ماخذ


1- Ahmad, M.O., Dennehy, D., Conboy, K., & Oivo, M. (2017). Kanban in Software Engineering: A Systematic Mapping Study, The Journal of Systems & Software, 133, 121-140.

2- Alrabghi, A., & Tiwari, A. (2016). A Novel Approach for Modelling Complex Maintenance Systems Using Discrete Event Simulation. Reliability Engeering & System Safety, 154, 160-170.

3- Arab, A., Ismail, N., & Lee, L.S. (2013). Maintenance scheduling incorporating dynamics of production system and real-time information from workstations, Journal of Intelligent Manufacturing, 24:4, 695-695.

4- Ayo-Imoru, R.M., & Cilliers, A.C. (2018). A survey of the state of condition-based maintenance (CBM) in the nuclear power industry, Annals of Nuclear Energy, 112, 177-188.

5- Azimi, P., Farajpoor Nazari, M., Esmati, A., & Farzin, A. (2013). Optimization via simulation & Enterprise Dynamics tutorial. Islamic Azad University of Qazvin press. Qazvin.

6- Bin, L., Shaomin, W., Min, X., & Way, K. (2017). A condition-based maintenance policy for degrading systems with age- and state-dependent operating cost, European Journal of Operational Research, 263:3, 879-887.

7- Chung, Ch. A. (2003). Simulation modeling handbook: a practical approach, CRC press, Inc. Boca Raton, FL, USA, ISBN 0-8493-1241-8.

8- Davoodi, S.M.R., Jolai, F., Mohaghar, A., & Mehregan, M.R. (2015). Designing a multi-Level Multi-Product inventory simulation model and comparing it with the

selected models; Case: Iran steel industries, Journal of Industrial Management Perspective, 5:19, 9-38.
9- Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis, Reliability Engineering and System Safety, 52:3, 229-240.
10- Duffuaa, S., Ben-Daya, M., Al-Sultan, K., & Andijani, A. (2001). A generic conceptual simulation model for maintenance systems, Journal of Quality in Maintenance Engineering, 7:3, 207-219.
11- Esmaeli, M., & Heidari, A. (2012). Key factors for success in establishing a pull production system, Journal of Industrial Management Perspective, 6, 45-66. (in persian)
12- Hou, T., & Hu, W. (2011). An integrated MOGA approach to determine the Pareto-optimal kanban number and size for a JIT system, Expert Systems with Applications 38, 5912–5918.
13- Houshmandi Maher, M., & Amiri, M., (2012). A model for Order Allocation in Multi Supplier, Multi Product and Multi Period Situation, Considering Incremental Discounts. Journal of Business Administration Researches. 4:7, 122-146.
14- Morton, J. M., Maier, P., & Trinder, P. (2016). JIT-Based Cost Analysis for Dynamic Program Transformations, Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 330, 5–25.
15- Mostafaa, S., Dumrakb, J., & Soltan, H. (2015). Lean maintenance roadmap. Procedia Manufacturing, 2, 434–444.
16- Motallebi, S., & Zandieh, M. (2017). Determination of Inventory Management Policies in Process Manufacturing: Using Discrete Event Simulation. Journal of Industrial Management Perspective, 26, 83-108. (In persian)
17- Nicolai, R.P., & Dekker, R. (2008). Optimal maintenance of multi-component systems: a review, in Kobbacy, K. and Murthy, D. N. (eds.) Complex system maintenance handbook, Springer, London, 263-286.
18- Nowakowski, T., & Werbinka, S. (2009). On problems of multicomponent system maintenance modelling, International Journal of Automation and Computing, 6:4, 364-378.
19- Oyarbide-Zubillaga, A., Goti, A., & Sanchez, A. (2008). Preventive maintenance optimisation of multi-equipment manufacturing systems by combining discrete event simulation and multi-objective evolutionary algorithms, Production Planning and Control, 19:4, 342-355.
20- Savsar, M. (1997). Simulation analysis of maintenance policies in just-in-time production systems. International Journal of Operations & Production Management, 17:3, 256-266.
21- Sharma, A., Yadava, G., & Deshmukh, S. (2011). A literature review and future perspectives on maintenance optimization, Journal of Quality in Maintenance Engineering, 17:1, 5-25.
22- Van Horenbeek, A., Buré, J., Cattrysse, D., Pintelon, L., & Vansteenwegen, P. (2013). Joint maintenance and inventory optimization systems: a review, International Journal of Production Economics, 143:2, 499–508.
23- Warrington, L., Jones, J.A., & Davis, N. (2002). Modelling of maintenance, within discrete event simulation, Annual Reliability and Maintainability Symposium, The International Symposium on Product Quality and Integrity, 260-268.
24- Zolikhaei Sayyar, L., Mosavi, E., pouya, M., & Naderi Mahdeei, K. (2017). Improving the Performance of Cooperative Businesses through Redesigning their Productive Capacity: A Case Study of Consumer Cooperatives in Hamedan. Journal of Business Administration Researches. 9:17, 1-30.