مقاله پژوهشی

ارزیابی و کنترل عوامل مؤثر بر بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات با رویکرد شبیه‌سازی سیستم‌های پویا
(مورد مطالعه: کارخانه سیمان قاین)

اعظم مدرس*
دانشجوی دکتری، مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. azam.modares@mail.um.ac.ir

وحیده بافندگان امروزی
دانشجوی دکتری، مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد. vahide.bafandeganemroozi@mail.um.ac.ir

زهرا مهمی
دانشجوی دکتری، مدیریت دولتی، دانشگاه زاهدان، Z_mohemi@atu.ac.ir

چکیده: عوامل و متغیرهای بسیار زیادی بر بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات سازمان‌ها تأثیر دارند که غفلت از آن‌ها ممکن است ضررات جبران‌ناپذیری بر سازمان‌ها وارد کند. از آنجا که ارتباط این عوامل با هم دارای پویایی‌ها و بازخوردهای فراوانی است، پویایی‌شناسی سیستم ابزاری مناسب برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان تجهیزات است. هدف از این مطالعه، ایجاد و توسعه‌ی روشی جدید برای ارزیابی و بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات یکی از صنایع مهم دنیا با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی در یک افق ۵ ساله است. در این راستا ابتدا متغیرهای کلیدی مؤثر بر بهبود قابلیت اطمینان، شناسایی و روابط آن‌ها در قالب نمودار انباشت تکمیل و شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که با اعمال سیاست‌های بهبود آموزش کارکنان، تخصیص منابع به نگهداری پیشگیرانه و.... قابلیت اطمینان تجهیزات به طور قابل توجهی افزایش و مدیران باید توجه بیشتری به این متغیرها کنند.
واژگان کلیدی: پویایی‌شناسی سیستم، قابلیت اطمینان، تعمیرات و نگهداری

۱- مقدمه
در عصرحاضر، یکی از بنیان‌های اساسی در صنعت و تولید، بدون شک تجهیزات و ماشین‌آلات است. از طرفی، افزایش بهره‌وری و کارآیی تولید، بدون افزایش زمان قابلیت استفاده و بهره‌برداری از تجهیزات و ماشین‌آلات میسر نخواهد بود [۱]. امروزه با پیشرفت بشر در حوزه‌های مختلف دانش، نیازهای صنایع دچار تغییر شده و مفاهیم پایایی و قابلیت اطمینان جایگاه ویژه‌ای در سیستم‌های صنعتی پیدا کرده است. به گونه‌ای که یکی از اهداف سازمان‌های صنعتی افزایش سطح قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری تجهیزات آن‌هاست [۲]. در هر جامعه‌ی مدرن، مهندسان و مدیران فنی، مسئول برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و بهره‌برداری از ساده‌ترین محصول تا پیچیده‌ترین سیستم‌ها هستند. از کارافتادن محصول-ها و سیستم‌ها موجب وقوع اختلال در سطوح مختلفی می‌شود و می‌تواند حتی به‌عنوان تهدیدی شدید برای جامعه و محیط زیست نیز تلقی شود. به همین دلیل، مصرف‌کنندگان و به طور کلی، جامعه انتظار دارند که محصول‌ها و سیستم‌ها، پایا، اطمینان‌بخش و ایمن باشند. بنابراین باید به جای تمرکز بر کاهش هزینه‌ها بر افزایش قابلیت اطمینان متمرکز شد. زیرا، با بهبود قابلیت اطمینان، قطعاً هزینه‌ها کاهش خواهد یافت [۳].
در دنیای صنعتی امروز با گسترش اتوماسیون و تجهیزات پیشرفته اهمیت قابلیت اطمینان دو چندان شده است. قابلیت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸
دوره ۱۱/ شماره ۲
صفحات ۱۰۵-۸۹

*Corresponding author (azam.modares@mail.um.ac.ir)

اطمینان بالا، از لحاظ اقتصادی هزینه‌های نگهداری تجهیزات را کاهش می‌دهد [۴]. همچنین از آنجایی که تجهیزات نقش مهمی در افزایش نرخ تولید و امنیت دارند، بهبود قابلیت اطمینان آنها به مدیران در کاهش هزینه‌های تولید به طور چشمگیری کمک می‌کند [۵]. از طرفی توقف تجهیزات و ماشین‌آلات به علت خرابی یا ازکارافتادگی منجر به توقف خط تولید در واحدهای تولیدی می‌گردد. بنابراین در این راستا دستیابی به عوامل مؤثر بر قابلیت‌اطمینان ضروری است [۶].

هم اکنون صنعت سیمان در معرض رقابت‌پذیری فزاینده‌ای قرار دارد. طراحان و سازندگان تجهیزات تولیدی جهت افزایش ظرفیت تولید ماشین‌آلات و رقابت با دیگر سازندگان ماشین‌آلات تولیدی به سمت طراحی ماشین‌آلات پیچیده و کم‌مصرف انرژی به منظور کاهش هزینه‌های تولید روی آورده‌اند. با وابستگی هرچه بیشتر به ماشین‌آلات پیچیده و کم‌مصرف موضوع قابلیت اطمینان عملکرد ماشین‌آلات صنعتی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۷]. به علاوه، با توجه به سیستم‌های تولیدی انبوه صنعت سیمان، افزایش قابلیت‌اطمینان تجهیزات جهت جلوگیری از توقف خط تولید نیز دغدغه‌ی جدیدی در صنایع سیمان به نظر می‌آید. در این برهه، جهت کنترل و مدیریت هزینه‌های تعمیراتی تجهیزات و نیز یافتن راه‌هایی جهت افزایش عمر مفید آنها و جلوگیری از توقفات تولید ناشی از خرابی تجهیزات و حذف اثرات سوء آن، مطالعه عوامل مؤثر بر قابلیت اطمینان تجهیزات مفیدبه نظر می‌رسد. قابلیت اطمینان بخصوص در سیستم‌های تولیدی پیوسته که از کار افتادن بعضی از قطعات باعث از کارافتادگی کل سیستم می‌شود و توقف کل سیستم را به همراه خواهد داشت از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. بنابراین باید تلاش کرد تمامی عوامل مؤثر بر قابلیت اطمینان سیستم شناسایی شود تا از بروز مشکلات عدیده‌ی از کارافتادگی سیستم جلوگیری شود. ارزیابی قابلیت اطمینان در صنایع با فرایندهای پیوسته مانند صنعت سیمان، که در آن‌ها هر ساعت توقف در فرایند تولید موجب وارد شدن خسارت‌های زیادی می‌شود، بسیار مورد توجه است.

طراحی بر اساس قابلیت‌اطمینان، به صورت یک معیار مهم از ملزومات طراحی در صنایع به شمار می‌رود که نقش مهمی در افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات دارد [۸]. بر اساس نگهداری و تعمیرات (نت) مبتنی بر قابلیت‌اطمینان می‌توان خرابی‌ها را پیش‌بینی کرد و آنها را در جهت داشتن یک سیستم نگهداری و تعمیرات مناسب و ایده‌آل، برنامه‌ریزی کرد [۹]. یکی از عوامل مهمی که قابلیت اطمینان تجهیزات را افزایش می‌دهد، وجود یک سیستم نگهداری و تعمیرات پیشرفته می‌باشد [۱۰]. تقریبا تمام تجهیزات دارای عمر محدود هستند و با گذشت زمان امکان خرابی و از کارافتادگی آن‌ها وجود دارد ([۱۱].

به منظور افزایش قابلیت اطمینان، ضمن تأکید روی اصلاح خرابی‌های اتفاقی و از کارافتادن غیرمنتظره‌ی تجهیزات، تاکنون با بهره‌گیری مناسب از علوم، آمار و احتمالات و پژوهش‌های عملیاتی، شبیه‌سازی، اقتصاد مهندسی، تئوری صف، تکنیک‌هایی برای حالات مختلف انواع دستگاه‌ها و تجهیزات، ابداع شده تا بدین وسیله، متخصصین این رشته، بتوانند قابلیت اطمینان را به حداکثر برسانند [۱۲].

مطالعات انجام گرفته در زمینه بهبود قابلیت اطمینان بسیار گسترده است. بخش عمده‌ای از تحقیقات در این زمینه، مسئله تخصیص افزونگی یا افزایش قابلیت اطمینان بر مبنای استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات بوده است [۱۳] و [۱۴]. به طور کلی در تخصیص افزونگی هدف تعیین تعداد نوع و اجزای اضافی در هر زیرسیستم به منظور افزایش قابلیت اطمینان است [۱۵]. در مسائل تخصیص افزونگی از مدل‌سازی ریاضی با هدف حداکثرکردن قابلیت‌اطمینان و محدودیت‌های بودجه، وزن و ... استفاده می‌شود که گنجاندن متغیرهای زیاد موجب پیچیدگی بیش از حد مدل‌ها می‌گردد. در صورتی که قابلیت اطمینان سیستم به عوامل و متغیرهای بسیار زیادی در سازمان بستگی دارد. معمولا مدل‌های مورد استفاده تخصیص افزونگی و تعمیرات و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان، صرفا بر تعداد اندکی متغیر تمرکز داشته و تعداد بسیار زیادی از متغیرهای مهم از جمله نقش اپرتور تجهیزات و قابلیت اطمینان انسانی مورد غفلت واقع شده‌اند. با توجه به کمبودهای هر یک از موارد فوق، این مقاله سعی در ایجاد مدلی که تمامی عوامل موثر بر قابلیت اطمینان تجهیزات سیمان را در برداشته باشد، دارد. با توجه به اینکه ارتباط متغیرها و عوامل موثر بر قابلیت اطمینان با هم دارای پویایی ها و بازخوردهای فراوانی است، پویایی‌شناسی سیستم ابزار مناسبی برای تجزیه و تحلیل عوامل موثر بر قابلیت اطمینان است. پویایی‌شناسی سیستم به‌عنوان روشی برای بررسی رفتار پویای سیستم با تاکید بر روابط بین عناصر تشکیل‌دهنده سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶]. این روش با انجام دادن شبیه-سازی و تحلیل رفتار سیستم با استفاده از فرضیه‌های مختلف، بازخوردی برای سیاست‌گذاران در زمینه تأثیر سیاست‌ها فراهم می‌کند تا آن‌ها به شکلی کارا و اثربخش سیاست‌گذاری کنند [۱۷]. با مطالعه‌ی پیشینه‌ی مربوط به مباحث قابلیت اطمینان، پایایی و پویایی سیستم و مرور ادبیات موجود در این زمینه‌ها،

این نتیجه به دست آمد که تاکنون با استفاده از پویایی سیستم، به حل مسائل موجود قابلیت اطمینان و نیز ارزیابی و کنترل پایایی پرداخته نشده است و بیشتر برای بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در این زمینه‌ها، از مدل‌سازی ریاضی بهره گرفته شده است؛ بنابراین با تبدیل این الگوهای با پایه ریاضی به الگوهای پویا، امکان تصویری واقعی‌تر از سیستم موردبررسی فراهم می‌گردد. مدل‌های ریاضی به واسطه اینکه حلقه‌های بازخورد را در نظر نمی‌گیرند دارای نقص بوده، در حالی که سیستم‌های پویا این مشکل را حل کرده و به هنگام تصمیم‌گیری اثربخشی بیشتری دارد [۱۸]. به عبارتی در مدل‌های پویا، توجه به بعد زمان و بازخوردهای موجود بین متغیرهای مدل و توجه به روابط چند-گانه بین متغیرها، مدل‌های سنتی را از حالت ایستایی خارج می-کند و توانایی آن‌ها را در پیش‌بینی افزایش می‌دهد [۱۹]. از این رو، در این پژوهش به نقشی که پویایی سیستم می‌تواند در بهبود عملکرد با ارزیابی قابلیت اطمینان داشته باشد، ایفا کند؛ توجه شده تا بدین‌ترتیب، بتوان با نگرشی سیستمی به ارزیابی و کنترل قابلیت اطمینان تجهیزات پرداخت و خلاء موجود را رفع نمود. مدل ارائه شده، می‌تواند در کشف راه های جدید تفکر، شناخت حساسیت‌های پنهان اهرم‌ها و نقاط فشار بر شرکت‌ها، به مدیران کمک کند.

۲- پیشینه پژوهش

قابلیت اطمینان بیانگر توانایی تجهیزات در آغاز و ادامه فعالیت می‌باشد و یکی از معیارها و مشخصات اصلی عملکرد یک سیستم است [۲۰]. به طور کلی قابلیت اطمینان را می‌توان کیفیت در درازمدت و یا احتمال عملکرد مطلوب یک وسیله در شرایط عملیاتی مشخص در دوره زمانی معین تعریف کرد [۲۱]. تحقیقات انجام شده در زمینه پویایی‌شناسی سیستم بسیار محدود و تنها بر یک یا چند عامل متمرکز است. نت پیشگیرانه از بین عوامل موجود، در پویایی بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

سلیمانی و ایرج پور (۱۳۸۵) با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم به ارائه مدلی به منظور تعیین سیاست نگهداری اثر بخش پرداختند. روش به کار گرفته شده بر پیش‌بینی خرابی‌های آینده با استفاده از متوسط فرصت‌های از دست‌رفته تجمعی می‌باشد. نتایج به طور صریح از سیاست نگهداری متغیر در مورد اینکه از سیاست نگهداری ثابت بهتر است و دارای هزینه چرخه عمر پایین‌تر و خرابی‌های تجمعی پایین‌تر می‌باشد حمایت نمی‌نماید [۲۲]. اسماعلیان، کودک‌زاده و زارعیان(۱۳۹۴) با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها به ارزیابی و مقایسه اثربخشی و پیاده-سازی نت اصلاحی و نت پیشگیرانه پرداختند. نتایج نشان می‌دهد تغییر این رویکرد از جنبه‌های مختلف به نفع شرکت است و سبب افزایش فروش و تعداد مشتریان می‌شود [۲۳]. بر طبق مطالعه جمشیدی و همکاران (۲۰۱۴) نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، تعمیرات عمده را کاهش می‌دهد و از عملکرد نامناسب تجهیزات پزشکی و اسقاط شدن آن ها جلوگیری می نماید [۲۴]. بینوا و منتماگیور(۲۰۰۵) پویایی‌شناسی سیستم را بر اساس سیستم نت مبتنی بر قابلیت اطمینان معرفی کرده‌اند. در این مدل خرابی ماشین‌آلات بر میزان موجودی، برآورده‌کردن سفارش و هزینه تولید تأثیر می‌گذارد، نتایج نشان می‌دهد که کاهش خرابی‌ها سبب افزایش نرخ تولید، کاهش هزینه تولید و کاهش چشمگیر میزان سفارش برگشتی می‌شود [۲۵]. قابل ذکر است که قابلیت اطمینان مبتنی بر نت، علم انتخاب فعالیت نت مناسب بر اساس قابلیت اطمینان مورد انتظار از سیستم و روشی است برای تشخیص عملیاتی که باید برای اطمینان از اینکه هر تجهیز، تأسیس، ماشین یا فرآیندی، کار مورد انتظار را انجام خواهد داد. با ایجاد و نهادینه‌سازی این نوع از نگهداری و تعمیرات در سازمان می‌توان نسبت به شبیه‌سازی ایرادها و اشکالات محتمل در سیستم، تجزیه و تحلیل برای هر حالت ممکن از خرابی دستگاه‌ها و در نهایت، ارائه راهکارهایی جهت پیش‌بینی و پیشگیری از آنها اقدام نمود [۲۶]. دینن، فان دالن و کوئن[۲](۲۰۰۸) با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای یک نمونه موردی به آنالیز و مدل‌سازی سیستم نت اصلاحی با هدف ارتقای این سیستم پرداخته‌اند و سپس با تغییر متغیرهای برون‌زای مدل سیاست‌های مختلف را ارزیابی کرده‌اند [۲۷].

بوهم، بک، کناک و یگر[۳](۲۰۰۸) نشان دادند که راهبردی مناسب برای نت خطوط را ه‌آهن لازم است تا امنیت و در دسترس‌بودن این سیستم تضمین شود. تعیین این راهبردها به دلیل پیچیدگی سیستم‌های نت آسان نیست. بر همین اساس در این تحقیق یک نمودار علی-معلولی برای بیان ارتباط بین شرایط سیستم، میزان در دسترس بودن سیستم، فعالیت نت و هزینه ارائه شده است [۲۸]. چومای[۴](۲۰۰۹) سیستم نت کارخانه‌ای در تایلند را

[1] Bivona, E. & Montemaggiore
[2] Deenen, Daalen, & Koene
[3] Bohm, BeckKnaak& Jager
[4] Chumai

مدل‌سازی کرده است. در این مدل متغیر انباشت میزان خرابی با دو نرخ تعمیرات خرابی‌ها و نرخ کاهش خطا از طریق نت برنامه‌ریزی‌شده کاهش پیدا می‌کند. خروجی این مدل زمان فعالیت کارخانه و هزینه نت است. نتایج این مدل این پیشنهاد را مطرح کرد که کارخانه‌های صنعتی در تایلند باید میزان نت پیشگیرانه را کاهش داده و در عوض نت پیش‌بین را ارتقا دهند [۲۹].

ناصر حمدی و همکاران[1] (۲۰۱۲) با تأکید بر اهمیت استراتژی‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات پزشکی و تاثیر از کارافتادگی تجهیزات پزشکی برمیزان مرگ‌ومیر بیماران، مدلی جهت اولویت‌بندی تعمیرونگهداری تجهیزات پزشکی در بیمارستان‌های اردن ارائه نموده‌اند. نتایج مطالعه ایشان نشان می‌دهد که به کارگیری این مدل تأثیر به‌سزایی بر حداقل‌سازی از کارافتادگی تجهیزات، افزایش قابلیت اطمینان آن‌ها، صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش ایمنی تجهیزات دارند [۳۰]. بصیرت، فضل‌الله تبار و مهدوی[2] (۲۰۱۳) مدلی را برای بررسی سیستم نت ارائه کرده‌اند. مدل معرفی شده شامل متغیرهای زیادی است و هدف این مدل ارزیابی قابلیت اطمینان و کنترل آن است. نتایج مدل نشان داده است که تغییری کوچک در فاکتورهای ثابت سبب تغییرات زیادی در کارایی کلی سیستم می‌شود [۳۱]. تاکنون تحقیقی که قابلیت نیروی انسانی و نقشی که انسان در بخش‌های مختلف تعمیرات و نگهداری برعهده دارد مورد بررسی قرار نگرفته است. قابلیت اطمینان مبتنی بر نیروی انسانی که به‌عنوان احتمال اینکه یک کار یا وظیفه توسط یک فرد در هر مرحله مشخصی از عملیات سیستم و در حداقل زمان باموفقیت انجام شود، تعریف می‌شود [۳۲]، تاکنون در پویایی‌شناسی سیتم مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این پژوهش این موضوع که نقش مهمی در عملکرد و قابلیت اطمینان کل تجهیزات دارد، مورد بررسی قرارگرفته است.

۳- چارچوب روش شناختی

در این پژوهش روش‌شناسی مبتنی بر رویکرد پویایی‌های سیستم و رویکردی از نوع کیفی - کمّی است. تکنیک پویایی‌های سیستم به‌عنوان یکی از مکاتب تفکر سیستمی، روش مناسبی برای مطالعه و مدیریت سیستم‌های پیچیده و دارای بازخورد است [۳۳]. مراحل تحقیق شامل بیان مسئله (انتخاب مرز مدل)، ارائه فرضیه‌های پویا یا روابط علت‌ومعلولی متغیرهای کلیدی مدل (مدل علّی- معلولی)، فرموله‌بندی کردن مدل، آزمون مدل (شبیه‌سازی و اعتبارسنجی الگو) و طراحی و ارزیابی سیاست‌ها و عملکردها (سناریوسازی) است. مراحل انجام تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۳-۱-گام اول: تعریف متغیرها؛ در این پژوهش تلاش شده است عوامل مؤثر بر قابلیت اطمینان تجهیزات کارخانه سیمان قاین شناسایی شود. بدین منظور ابتدا رفتار متغیرهای مربوط به یک دوره زمانی و موثر بر قابلیت اطمینان تجهیزات به صورت همزمان با کسب نظر از خبرگان و مطالعه منابع شناسایی تحلیل و ارزیابی شد. جدول (۱) متغیرهای تاثیرگذار بر مدل را نشان می‌دهد.

۳-۲- گام دوم: توسعه فرضیه‌های پویا؛ پس از مشخص شدن متغیرهای مسئله، ماهیت پویای مسئله در قالب حلقه‌های بازخوردی با شناسایی روابط متغیرها بر هم ارائه شد. پس از شناسایی زیر سیستم‌ها بازخوردهایی که در هر زیر سیستم وجود دارد ایجاد شد. پس از شناسایی متغیرهای کلیدی و پیدا کردن علل این متغیرها، نمودار علی-حلقوی رسم گردید. با کنار هم قرار دادن فرضیه‌های پویا، ساختار کلی مدل دینامیکی مسئله به صورت زیرمعرفی شد. این دو زیر سیستم توسط متغیر آموزش کارکنان و هزینه کل به یکدیگر متصل می‌شوند. شکل (۱) و (۲) بیانگر فرضیه‌های پویای زیرسیستم‌های شناسایی شده است.

۳-۳- گام سوم: مدل‌سازی و فرمولبندی مدل؛ پس از شناسایی عوامل و متغیرها و همچنین شکل‌بندی روابط علت و معلولی بین آن‌ها در قالب فرضیه پویا، نمودار انباشت و جریان مطابق شکل (۳) ترسیم گردید. نمودار جریان برای نمایش جریان‌های فیزیکی یا اطلاعاتی در مدل پویایی‌های سیستم مفید است [۳۴]. متغیرهای حالت به صورت مستطیلی نشان داده می‌شوند که جریان های انباشته در آن سطح را بازنمایی می‌کنند. به عبارت دیگر متغیرهای حالت، نتایج اعمال درون یک سیستم را تجمیع می‌کنند. متغیرهای حالت همان انباشتگی‌هااند که وضعیت سیستم را مشخص کرده اطلاعاتی را ایجاد می‌کنند که بر مبنای آن‌ها تصمیم‌گیری و اقدام می‌شود. در انتهای هر فاصله زمانی، ارزش هر سطح مجدداً محاسبه می‌شود که به وسیله ارزش قبلی آن و نرخ‌های ورودی وخروجی به متغیر حالت در طول

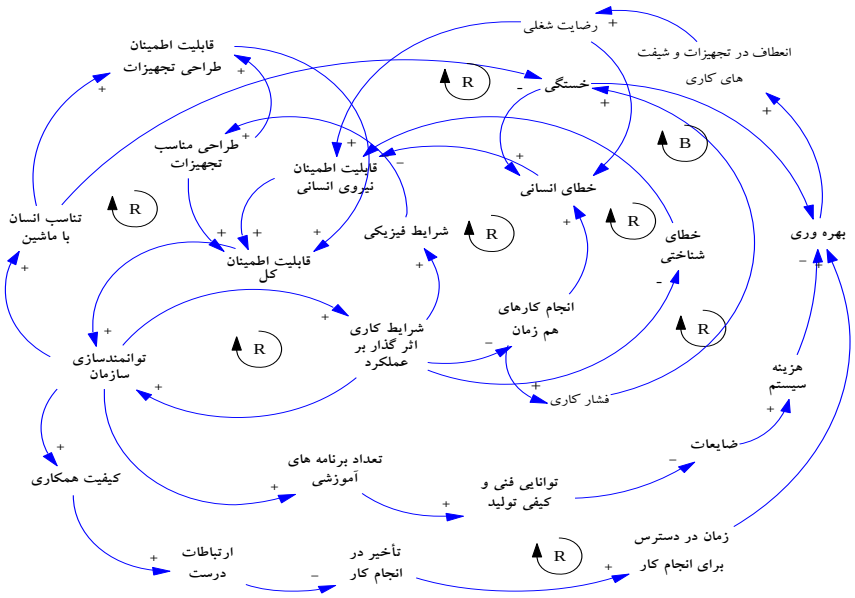
[1] Naser Hamdi ,Rami Oweis, Hamzeh Abu Zraiq, Denis Abu Sammour

[2] Basirat, Fazlollahtabar & Mahdavi

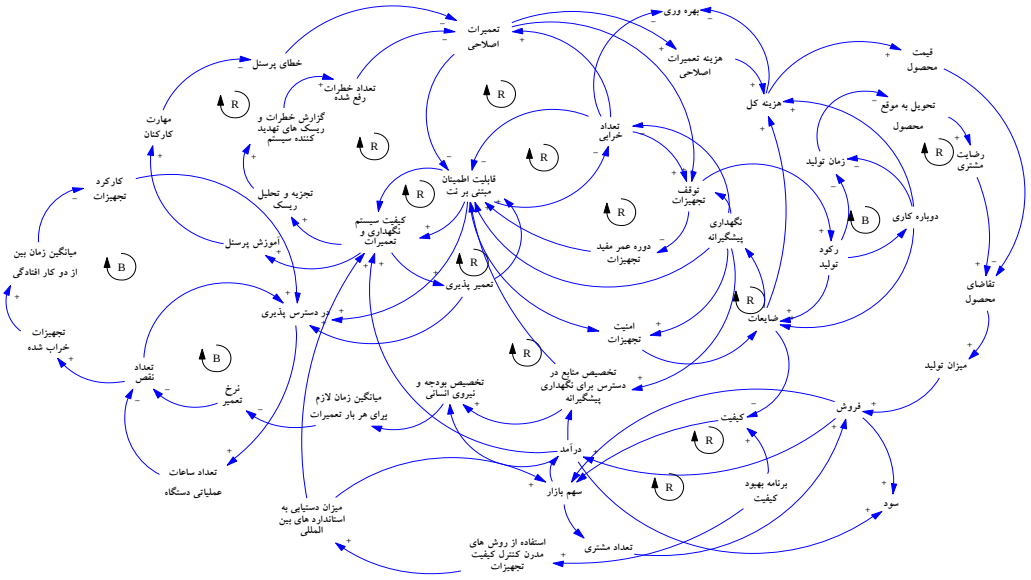
بازه‌ی زمانی تعیین می‌گردد [۱۷]. انباشت‌ها در این مدل (متغیرهای حالت) شامل قابلیت اطمینان کل، قابلیت اطمینان مبتنی بر نت، قابلیت اطمینان طراحی تجهیزات، قابلیت اطمینان نیروی انسانی، سود، مهارت کارکنان، تجهیزات خراب شده، نواقص کشف شده، برنامه بهبود کیفیت، دوباره‌کاری، ضایعات و قیمت محصول هستند. مهمترین متغیرهای نرخ بهبود قابلیت اطمینان شامل: نرخ خرابی، نرخ تعمیر، نرخ ازکار افتادگی، نرخ اصلاح نقص‌ها، نرخ کشف نقص‌ها، نرخ افزایش توانایی نیروی انسانی، نرخ خطای شناختی انسان، نرخ افزایش مهارت کارکنان، نرخ کاهش توانایی کارکنان، نرخ اصلاح عیوب، نرخ دوباره‌کاری‌های انجام شده، نرخ کارهای نادرست، درآمد و هزینه ... هستند و مواردی نظیر تعمیرپذیری، در دسترس‌پذیری، نگهداری پیشگیرانه، نگهداری اصلاحی، کیفیت نگهداری و تعمیر، خطای پرسنل، آموزش کارکنان، کیفیت، میزان دستیابی به استانداردهای بین‌المللی بهره‌وری و ... به‌عنوان متغیرهای کمکی در مدل استفاده شده است. فرمولبندی یک مدل مفهومی، بینش‌های زیادی را برای محقق، حتی پیش از اجرای شبیه‌سازی به وجود می‌آورد. این گام به محقق کمک کرد تا مفهوم‌های مبهم تشخیص دهد و درک مناسبی از کل سیستم به دست آورد.

جدول ۱- متغیرهای تأثیرگذار بر مدل

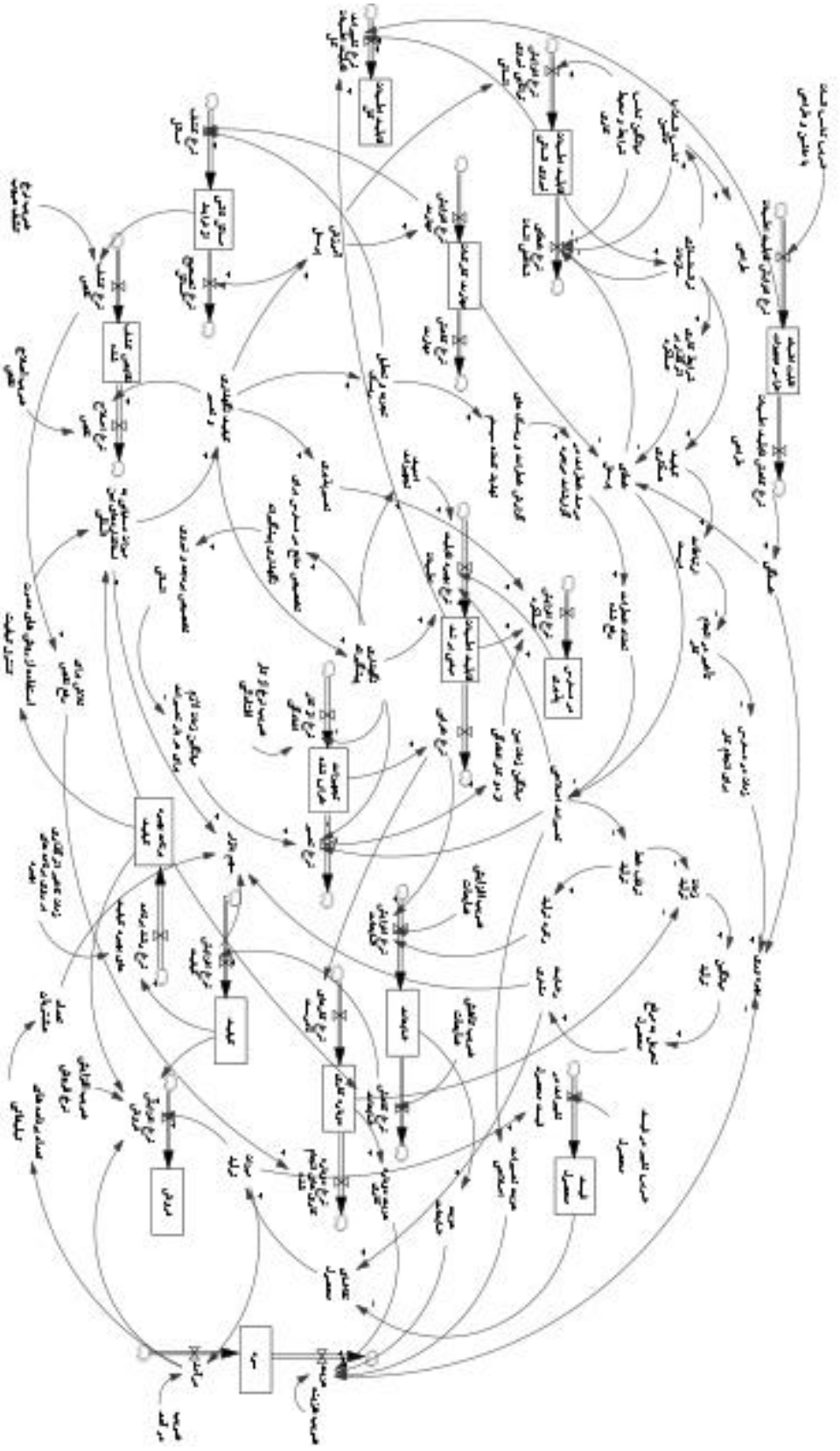
ردیف	متغیرهای تأثیرگذار	ردیف	متغیرهای تأثیرگذار	ردیف	متغیرهای تأثیرگذار
۱	قابلیت اطمینان کل	۲۲	سود	۴۳	امنیت تجهیزات
۲	تعمیرپذیری	۲۳	درآمد	۴۴	نرخ تولید
۳	دسترس‌پذیری	۲۴	هزینه	۴۵	فروش
۴	کیفیت سیستم نگهداری و تعمیرات	۲۵	قیمت	۴۶	روش‌های مدرن کنترل کیفیت تجهیزات
۵	نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه	۲۶	زمان در دسترس برای انجام کار	۴۷	زمان تولید
۶	نگهداری و تعمیرات اصلاحی	۲۷	تناسب انسان با ماشین	۴۸	تعداد عیوب
۷	روش‌های نوین کنترل کیفیت	۲۸	دوباره کاری	۴۹	نرخ خرابی
۸	توقف خط تولید	۲۹	سهم بازار	۵۰	تعداد خطرات رفع شده
۹	دستیابی به استانداردهای بین‌المللی	۳۰	کیفیت محصول	۵۱	تأخیر در انجام کار
۱۰	تجزیه و تحلیل ریسک	۳۱	ضایعات	۵۲	میانگین تولید
۱۱	برنامه‌های بهبود قابلیت اطمینان	۳۲	تجهیزات خراب شده	۵۳	تأخیر در زمان تحویل
۱۲	خطای پرسنل	۳۳	آموزش کارکنان	۵۴	کیفیت همکاری
۱۳	بهره‌وری	۳۴	مهارت کارکنان	۵۵	ارتباطات درست
۱۴	خستگی کارکنان	۳۵	نواقص کشف شده	۵۶	مسائل ناشی از فرایند
۱۵	رضایت مشتری	۳۶	قابلیت اطمینان نیروی انسانی	۵۷	تجزیه و تحلیل ریسک
۱۶	توانمندسازی سازمان	۳۷	قابلیت اطمینان مبتنی بر نت	۵۸	گزارش خطرات تهدیدکننده سیستم
۱۷	میانگین زمان بین دو از کار افتادگی	۳۸	میانگین زمان لازم برای هر بار تعمیر	۵۹	تقاضای محصول
۱۸	تخصیص منابع در دسترس برای نگهداری پیشگیرانه	۳۹	بودجه و نیروی انسانی	۶۰	رکود تولید
۱۹	تعداد خطرات رفع شده	۴۰	شرایط کاری اثر گذار بر عملکرد	۶۱	زمان در دسترس برای انجام کار
۲۰	بهره‌وری	۴۱	تأخیر در انجام کار	۶۲	مسائل ناشی از فرایند
۲۱	تعداد برنامه های تبلیغاتی	۴۲	تعداد مشتریان	۶۳	برنامه بهبود کیفیت



شکل ۱- نمودار علی-معلولی زیرسیستم قابلیت اطمینان نیروی انسانی و طراحی تجهیزات



شکل ۲- نمودار علی معلولی زیر سیستم مبتنی بر نت



شکل ۲-نمودار اجابت جریا

۴-نتایج تحقیق

با تکمیل شبیه‌سازی مدل و همچنین ورود ارتباط بین متغیرها به نرم‌افزار ونسیم، خروجی‌های مدل با اجرای شبیه‌سازی به دست آمد. این شبیه‌سازی، در افق زمانی پنج ساله به اجرا در آمده است. در شکل ۴ مشاهده می‌شود کیفیت سیستم نگهداری و تعمیرات روندی افزایش داشته است و از میزان ۲۵ واحد در ابتدای دوره‌ی شبیه‌سازی به میزان حدود ۱۸۰ واحد در پایان دوره، افزایش پیدا کرده است. شکل ۵ بیانگر آن است که سود سازمان از صفر به یک میلیون واحد پولی رسیده است.

در شکل ۶ مشاهده می‌شود مهارت کارکنان، به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در بهبود یک سیستم نگهداری و تعمیرات، نیز در طول دوره‌ی شبیه‌سازی رشد داشته است. به گونه‌ای که از میزان حدود ۶۰۰ واحد در ابتدای دوره به حدود ۲۲۶۰ واحد در پایان دوره رسیده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که نرخ خرابی، به صورت تابع توزیع نمایی، روندی کاهشی را با خود به همراه داشته است، به گونه‌ای که این میزان از حدود ۰,۹ در ابتدای ماه اول به حدود نزدیک به صفر در پایان دوره‌ی شبیه‌سازی رسیده است. در اشکال ۸، ۹، ۱۰، ۱۱،۱۲ که به ترتیب بیانگر مقدار قابلیت اطمینان طراحی تجهیزات، قابلیت اطمینان نیروی انسانی، کل و مبتنی بر نت، نگهداری پیشگیرانه هستند، طراحی تجهیزات روندی افزایشی را از خود نشان داده است. در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، روندی خطی و افزایشی را داشته است. این میزان از مقدار ۲۵ در ابتدای ماه اولبه مقدار ۱۸۰در پایان دوره‌ی شبیه‌سازی رسیده است. در شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد،

تعداد خرابی‌های تجهیزات و ماشین‌آلات، روندی خطی و کاهشی را داشته است. این میزان از حدود ۶۰ ماشین در ابتدای ماه اول به حدود صفر ماشین در پایان دوره‌ی شبیه‌سازی رسیده است. نتایج و روند پیش بینی متغیرهای مهم در این مدل در زیر آورده شده است

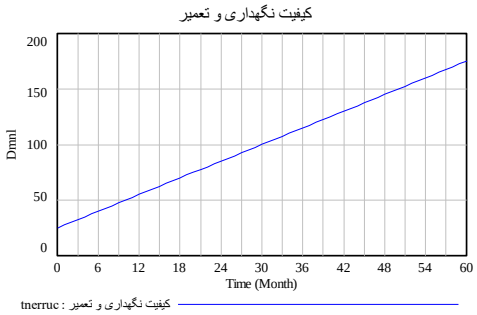
۴-۱- بازسازی رفتار مرجع

آزمون بازسازی رفتار مرجع بررسی می‌کند که شبیه‌سازی مدل با توجه به مقادیر مناسب می‌تواند رفتار گذشته متغیرهای مهم را به دقت شناسایی کند یا خیر؟ [۳۵]. آزمون بازسازی رفتار مرجع به این صورت است که روند شبیه‌سازی شده بعضی از متغیرهای مهم الگو توسط نرم‌افزار و الگوی طراحی شده با روند تغییرات آن‌ها در دنیای واقعی (بر اساس آمارهای واقعی) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. الگوی طراحی‌شده باید بتواند مقادیری نزدیک به واقعیت را در خصوص متغیرهای مورد بررسی شبیه‌سازی کند. در این پژوهش برای بررسی دقیق‌تر اعتبار الگوی طراحی شده از داده‌های سه سال گذشته استفاده شده است. مقادیر تولید و فروش محصول بر حسب تن می‌باشد. برای استخراج داده‌های استفاده شده در این قسمت، پس از بررسی‌ها، مشاهده داده‌های بایگانی و مصاحبه با کارشناسان، داده‌های قابل اعتمادی برای متغیرها استخراج شد. در کارخانه سیمان قاین تقریبا هر میزان محصولی که روزانه تولید می‌شود، به فروش می‌رسد و میزان محصول تولید شده با محصول فروش‌رفته تقریبا برابری می‌کند. همان‌طور که از شکل‌های ۱۴، ۱۵، ۱۶ مشخص است نتایج شبیه سازی مدل برای داده‌های واقعی اصلی مسئله با اعتبار خوبی با مقادیر واقعی آن همخوانی دارد.

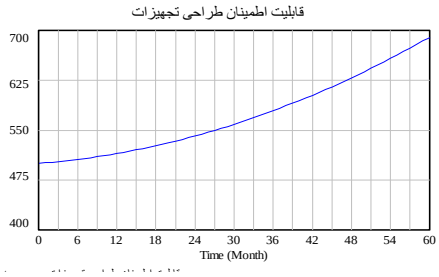
به عبارت دیگر، الگوی طراحی شده توانایی تشریح روند واقعی داده‌ها را دارد و به نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌توان اعتماد کرد. اطلاعات واقعی در نمودار تحت عنوان Base Run نامگذاری شده‌اند و نتایج شبیه‌سازی در نمودارها تحت عنوان Refrence Mode نام گذاری شده است. همانطور که در شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ ملاحظه می‌شود، نتایج شبیه‌سازی شده متغیرهای تولید، فروش و تعداد مشتریان به نتایج واقعی آن در نمودارها بسیار نزدیک است. این امر بیانگر آن است که رفتار متغیرهای مورد بررسی به خوبی شبیه‌سازی شده است. بنابراین به دلیل اختلاف کم داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده می‌توان به اعتبار مدل پی برد.

۴-۲- شبیه‌سازی رفتار حدی (آزمون شرایط حدی)

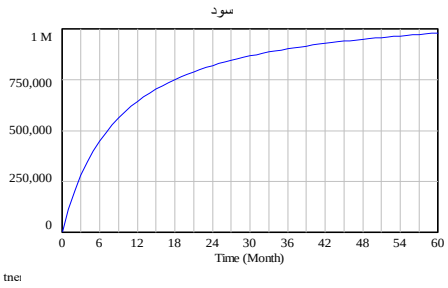
شرایط حدی مربوط به زمانی است که اگر شاخص های مدل به بیشترین و کمترین حد خود برسد تعادل مدل به هم نریزد و مشخص شود منطق درستی بر مدل حاکم است. این آزمون نشان می‌دهد که آیا سیستم رفتار قابل ملاحظه ای از خود نشان می‌دهد یا خیر؟ به عبارتی در سنجش اعتبار مدل می‌توان شرایط رفتاری که ممکن است هرگز در جهان واقعی مشاهده نشود را توصیف کرد و سپس بررسی شود که آیا ساختار مدل واکنش مناسبی دارد یا خیر [۳۵]. در این پژوهش مدل در دو شرایط حدی در نظر گرفته شده است. شکل ۱۷ نشان می‌دهد اگر میزان تقاضای محصول به صفر برسد تولیدی صورت نخواهد گرفت و



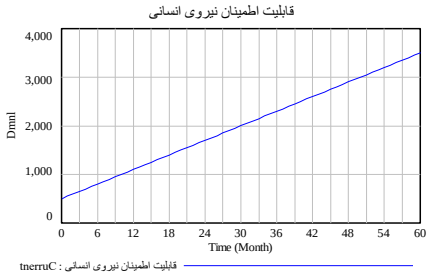
شکل ۴- الگوی رفتاری کیفیت نگهداری و تعمیرات



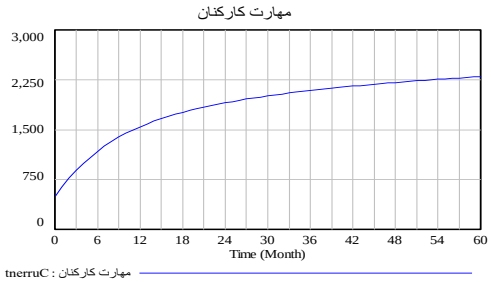
شکل ۸- الگوی رفتاری قابلیت اطمینان طراحی تجهیزات



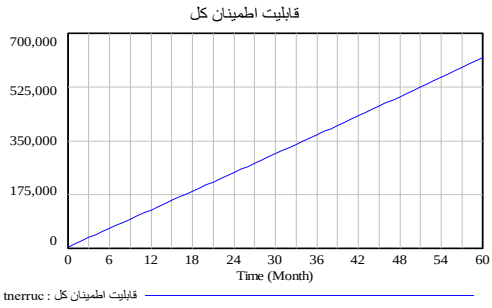
شکل ۵- الگوی رفتاری سود



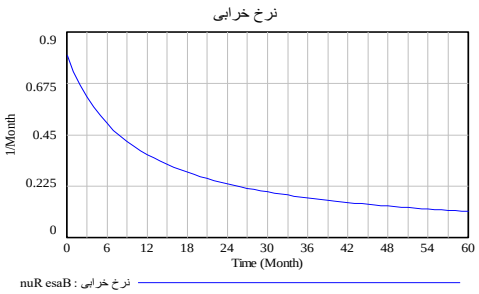
شکل ۹- الگوی رفتاری قابلیت اطمینان نیروی انسانی



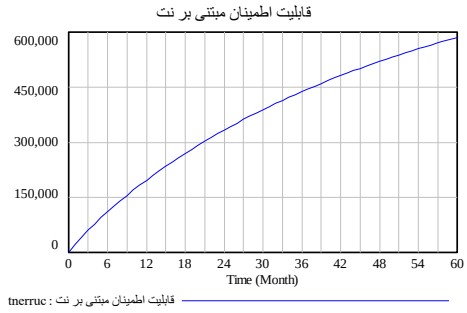
شکل ۶- الگوی رفتاری مهارت کارکنان



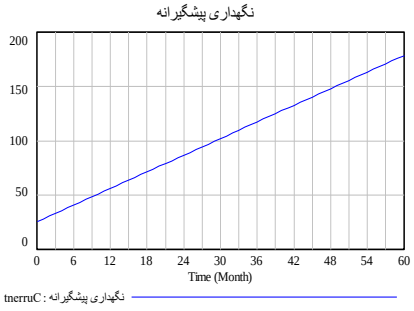
شکل ۱۰- الگوی رفتاری قابلیت اطمینان کل



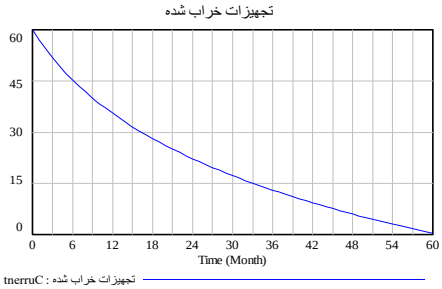
شکل ۷- الگوی رفتاری نرخ خرابی



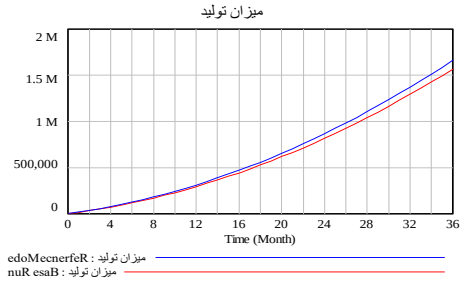
شکل ۱۱- الگوی رفتاری قابلیت اطمینان مبتنی بر نت



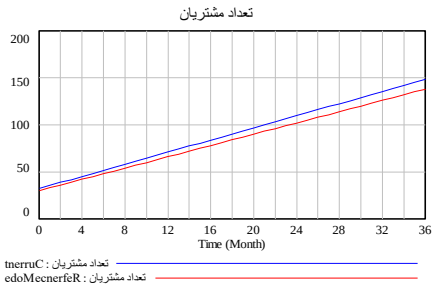
شکل ۱۲- الگوی رفتاری نگهداری پیشگیرانه



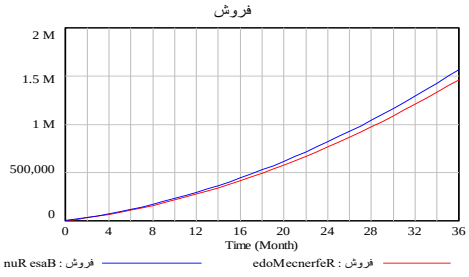
شکل ۱۳- الگوی رفتاری تجهیزات خراب شده



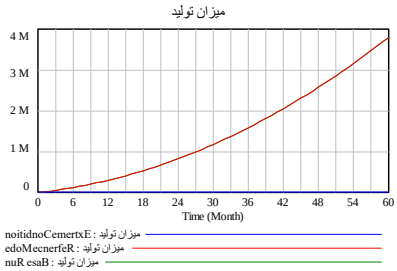
شکل ۱۴- آزمون رفتار مجدد مربوط به میزان تولید



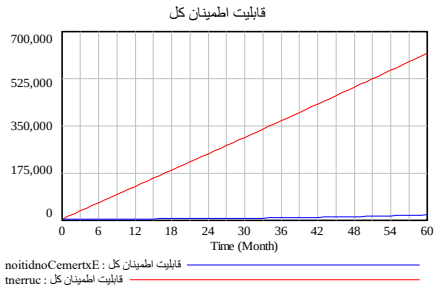
شکل ۱۵- آزمون رفتار مجدد مربوط به تعداد مشتریان



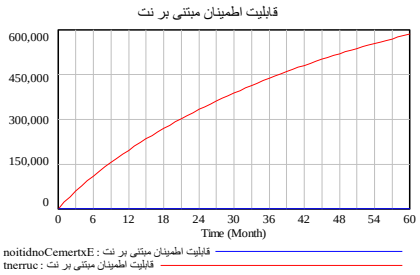
شکل ۱۶- آزمون رفتار مجدد مربوط به فروش



شکل ۱۷- تغییرات حاصل از آزمون شرایط حدی میزان تولید



شکل ۱۸- تغییرات حاصل از آزمون شرایط حدی قابلیت اطمینان کل

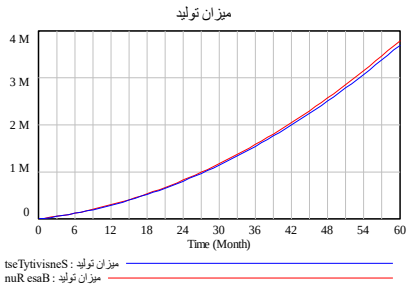


شکل ۱۹- تغییرات حاصل از آزمون شرایط حدی قابلیت اطمینان مبتنی بر نت

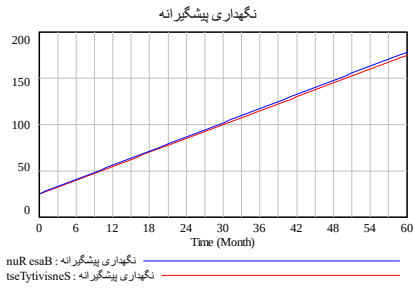
میزان فروش محصول صفر خواهد شد. شکل ۱۸ نشان می‌دهد اگر نگهداری پیشگیرانه صفر شود، قابلیت‌اطمینان کل به صفر نزدیک می‌شود. شکل ۱۹ بیانگر این است اگر نگهداری پیشگیرانه صفر شود قابلیت اطمینان نزدیک به صفر خواهد شد.

۴-۳-آزمون حساسیت

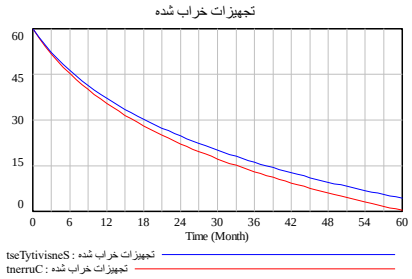
این آزمون بر خلاف آزمون حالت حدی، مربوط به زمانی است که تغییرات کوچک و قابل پیش‌بینی در پارامترهای مدل نباید تغییرات شدید و غیر قابل پیش‌بینی در رفتار مدل ایجاد کند. در این تحلیل با تغییر یک پارامتر یا متغیر در محدوده‌ای مشخص، تغییر رفتار مدل بررسی می‌شود تا حساسیت رفتار مدل نسبت به این پارامتر یا متغیر حساس مشخص شود. مقدار متغیر منابع تخصیص یافته به نگهداری و تعمیر از صفر به ۱۰ در تمامی تحلیل‌ها تغییر پیدا کرده است. شکل ۲۰ تحلیل حساسیت میزان تولید را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، با وجود اینکه منابع تخصیص‌یافته به نگهداری و تعمیرات کاهش یافته اما میزان تولید تغییر چندانی کرده است. شکل ۲۱ تحلیل حساسیت مربوط به متغیر نگهداری و پیشگیرانه را نشان می‌دهد. در این آزمون هم تغییر چندانی در نگهداری پیشگیرانه با کاهش منابع ایجاد نشده است. در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود تجهیزات خراب شده به میزان بسیار کمی کاهش یافته است. با توجه به آزمون‌های مطرح شده اعتبار آزمون رفتار مجدد (مقایسه با الگوی مرجع)، آزمودن توانایی مدل تحت شرایط حدی و آزمون حساسیت مدل تأییدشده و می‌توان از آن برای آزمون سیاست‌های پیشنهادی استفاده نمود.



شکل ۲۰- نتایج تست تجزیه و تحلیل حساسیت میزان تولید



شکل ۲۱- نتایج تست تجزیه و تحلیل حساسیت نگهداری پیشگیرانه



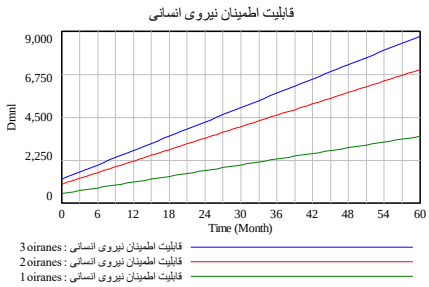
شکل ۲۲- نتایج تست تجزیه و تحلیل حساسیت تجهیزات خراب‌شده

۴-۴- سناریو سازی و تجزیه و تحلیل داده ها

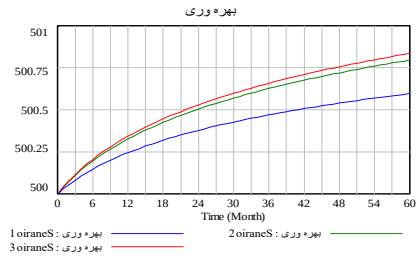
به منظور مشاهده رفتارهای محتمل الگوی سیستمی در آینده، سناریوی تغییر تعداد برنامه‌های آموزشی و تأثیر ان بر قابلیت نیروی انسانی، قابلیت اطمینان کل و بهره‌وری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۲۳) تأثیر تغییر تعداد برنامه‌های آموزشی را بر قابلیت نیروی انسانی نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است با تغییر دوره‌های آموزشی قابلیت اطمینان نیروی انسانی هم تغییر می‌کند. شکل (۲۴) نشان می‌دهد هنگامی که برنامه های آموزشی افزایش می یابد بهره‌وری به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. نمودار شکل (۲۵) اثر تغییر تعداد برنامه-های آموزشی را روی میزان مهارت کارکنان نشان می‌دهد که این امر به پیشرفت در ابعاد دیگر و در نهایت کل سازمان می‌انجامد. همان‌گونه که در شکل (۲۶)، مشاهده می‌شود؛ هنگامی که تعداد دوره‌ها و برنامه‌های آموزشی به‌عنوان یک عامل مؤثر در سیستم نگهداری و تعمیرات تغییر می‌یابد، میزان مهارت کارکنان نیز افزایش می‌یابد. نمودار شکل (۲۷) اثر تغییر تعداد برنامه‌های آموزشی را بر قابلیت‌اطمینان کل نشان می‌دهد. تعداد برنامه‌های آموزشی در این نمودار، از ۰,۱ برنامه (سناریوی اول) در ماه به ۰,۳۳ در ماه (سناریوی دوم)، یعنی، هر چهار ماه یک‌بار و در نهایت، به ۰,۵ در ماه(سناریوی سوم)، تغییر کرده است. روند نمایش نمودارها بر اساس تأثیر آنها و از پایین به بالا است. بنابراین در سناریوی اول امتیاز مهارت در پایان شبیه‌سازی به ۲۲۵۰ واحد، در سناریوی دوم به ۲۶۰۰، در سناریوی سوم به ۲۹۰۰ افزایش پیداکرده است.

بدین ترتیب، اهمیت دوره‌ها و برنامه‌های آموزشی در یک سازمان آشکار می‌شود. می‌توان با برگزاری دوره‌های آموزشی در یک سازمان، با پیشرفت قابل توجه مهارت کارکنان در سازمان مواجه

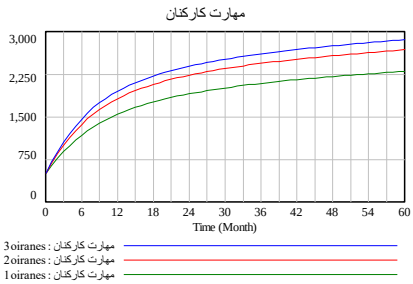
شد که این امر، به پیشرفت در ابعاد دیگر و در نهایت، کل سازمان می‌انجامد.



شکل ۲۳- مقایسه شاخص قابلیت اطمینان نیروی انسانی بر اساس سناریوهای مختلف



شکل ۲۴- مقایسه شاخص بهره‌وری بر اساس سناریوهای مختلف



شکل ۲۵- مقایسه شاخص مهارت کارکنان بر اساس سناریوهای مختلف

شکل ۲۶- مقایسه شاخص قابلیت اطمینان کل بر اساس سناریوهای مختلف (تغییر سطح مبنای تخصیص‌یافته به نگهداری پیشگیرانه)

شکل ۲۷- مقایسه شاخص قابلیت اطمینان کل بر اساس سناریوهای مختلف (تغییر سطح آموزش کارکنان)

۵- نتیجه گیری

قابلیت اطمینان تجهیزات سازمان‌ها نقش تعیین کننده‌ای در بقای سازمان و کسب مزیت‌های رقابتی برای آن ایفا می‌کند. در این پژوهش، سعی شد برای حل مسائل پیچیده دنیای کنونی به ویژه قابلیت‌اطمینان تجهیزات، روشی مناسب و سیستمی ارائه شود؛ چرا که حل مسائل مذکور با روش‌های ریاضی و خطی فعلی با محدودیت‌ها و مشکلاتی، همراه خواهد بود و قادر به ارائه نتایج کاملاً واقعی نیست. برای این منظور، یکی از روش‌های مناسب، استفاده از پویایی‌شناسی سیستم است که در پژوهش حاضر با طراحی یک مدل پویا با رویکرد تحلیل پویایی‌های سیستم و شبیه‌سازی رفتار آن به بررسی عوامل مؤثر بر ارزیابی و کنترل قابلیت اطمینان تجهیزات در کارخانه سیمان قاین پرداخته شد. روش پویایی‌شناسی سیستم با تحلیل و شناسایی رفتار متغیرها می‌تواند وضعیت متغیرهای موردنظر و متغیرهای وابسته به آنها را در افق موردنظر برآورد و تحلیل کند. مدل ارائه شده در این تحقیق با در نظر گرفتن متغیرهای بیشتری که بر تعمیرات و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان مؤثرند و همچنین قابلیت نیروی انسانی که بر قابلیت اطمینان تجهیزات و عملکرد آنها تأثیر بسیار زیادی دارد، مورد بررسی قرار گرفته و نسبت به تحقیقات پیشین کامل‌تر است. نتایج حاصل از مدل اعتبار مدل را نشان داد. افق تحقیق پنج ساله (۶۰ ماهه) می‌باشد (واحد زمان ماه در نظرگرفته شده است)، تا دوره زمانی ۳۶ ماه در واقع بازسازی رفتار سیستم صورت گرفت و رفتار حاصل شده از ساختار مدل ایجاد شده با الگوی مرجع مقایسه شد. حالت‌های حدی مورد بررسی قرارگرفته مدل، گویای صحت معماری و ساختار آن است. بر اساس افق زمانی پنج ساله هم شبیه‌سازی رفتار سیستم برای دوره‌های زمانی آینده صورت گرفت. در واقع این مطالعه بیان می‌کند که در صورت تغییر متغیرهای تأثیر گذار بر قابلیت

اطمینان مثل سطح آموزش کارکنان، منابع تخصیص‌یافته به نگهداری پیشگیرانه، کیفیت نگهداری وتعمیرات و...به میزان قابل توجهی قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که قابلیت اطمینان کل در پایان دوره شبیه‌سازی به حدود ۷۰۰ هزار، قابلیت اطمینان مبتنی برنت به حدود ۶۰۰ هزار، قابلیت اطمینان نیروی انسانی به ۳۵۰۰ واحد رسیده است. مدل ارائه شده در این تحقیق از مدل های پیشین از نظر مدل‌سازی کامل تر است؛ اما می‌توان آن را با افزودن زیرسیستم‌های دیگری بهبود بخشید و برای صنعت مورد نظر تطبیق داد. قابلیت‌اطمینان طراحی تجهیزات نقش بسیاری را در عملکرد و قابلیت اطمینان کل تجهیزات دارد که در این تحقیق متغیرهای مرتبط با آن به طور کامل شناسایی نشده و می توان با شناسایی بیشتر متغیرها مدل را ارتقا بخشید. همچنین با تعریف متغیرهای جدیدی مثل نت بهره ور جامع و نت پیش‌بین زیر سیستم مربوط به نت را کامل‌تر نمود. با وارد کردن متغیرهای بیشتر به مدل اولیه باعث می‌شود رفتار مدل به واقعیت نزدیک شود و مدیران بتوانند تصمیم‌های راهبردی مناسب‌تری بگیرند.

۶- منابع

[1] Compare, M., Baraldi, P, I., Bani, E., Zio, D. McDonnell., D. (2020). Industrial Equipment Reliability Estimation: a Bayesian Weibull Regression Model with Covariate Selection, *Reliability Engineering & System Safety*, V. 200.

[2] Hadipour, H., Amiri, M., Sharifi., M. (2018). Redundancy allocation in series-parallel systems under warm standby and active components in repairable subsystems, *Reliab Eng Syst Saf*, 192 1-18.

[3] Gong, M., Liu, H., peng, R. (2020). Redundancy allocation of mixed warm and cold standby components in repairable K-out-of N systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *journal of risk and Reliability*, 232 38-51.

[4] Ardakan, M., Sima, M., Hamadani, A., Coit, DW. (2016). A novel strategy for redundant components in reliability-redundancy allocation problems. *IIE Transactions*, 48(11), 1043-57.

[5] Nakagawa, T. (2005). Maintenance theory of reliability. Verlag London; *Springer*, 1108-1113.

[6] Gregory., L. (2017). Optimization of Component Allocation/Distribution and Sequencing in Warm Standby Series-Parallel Systems, *IEEE Transactions on Reliability* , 66(4) , 1-23.

[7] Kumar U, Klefsjo P, H, (2003). *Handbook of* Reliability *Engineering*. United States of America; Springer.

[8] Wang, Zh., Huang, H. Zh., Li, Y., Pang, Y., Xiao, N, (2012). An approach to system reliability analysis with fuzzy random variables. *Mechanism and Machine Theory*, 52, 35–46.

[9] Rahimdel., S, Hosienie., G, Khalokakaei., F. (2013). The Reliability and Maintainability Analysis of Pneumatic System of Rotary Machines, *The Institution of Engineers*, 94(2), pp.105-111.

[10] Wang, X., Su, C, (2016). A two-dimensional preventive maintenance strategy for items sold with warranty.*31.International Journal of Production Research*, 54 (19), 5901–5915.

[11] Wang Y, Deng D, (2014) A corrective maintenance scheme for engineering equipment, *Engineering Failure Analysis*, 36, 269-283.

[12] Vlachos, D., Georgiadis, P., Iakovou, E (2007). A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains; *Computers & Operations Research* 34, 367–394.

[13] Ardakan M, Hamadani A. Reliability optimization of series–parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems. *Reliability Engineering & System Safety*, 130:13 (2014), 2-9.

[14] Ardakan, M., Rezvan, M. T. (2017). Multi objective optimization of reliability-redundancy allocation problem with cold-standby strategy using NSGA-II. *Reliability Engineering & System Safety, 1-36.*

[15] Gholinejad., H, Hamadani., A. (2017). A new model for the redundancy allocation problem with component mixing and mixed redundancy strategy, *Reliability Engineering and System Safety*, 164, 66-73.

[16] Sterman., J. D. (2000). *Business Dynamics System Thinking and Modeling for a Complex World.* McGraw – Hill publication.

[17] Jeng., B, Chen., Jx, Liang., TP. (2006). Applying Data Mining to Learn System Dynamics

in a Biological Model. *Expert Systems with Applications 30, 50 -58.*

[18] Oganlana., S. (1996). A dynamic model for civil engineering design management, *Information Representation and Delivery in Civil and Structureal Engineering Design*, Vol 24. pp:47-56.

[19] Zoha, W.,& Rena., H. (2011). A system dynamics model for evaluating the alternative of type in construction and demolition waste recycling center. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 93-944.

[20] Modares., M, Kaminskiy., M.P, Krivstsov,V. (2016). Reliability engineering and risk analysis: a practical guide. CRC press 522.

[۲۱] امیری، م؛ عظیمی، پ؛ زندیه، م؛ (۱۳۹۵). بهینه‌سازی قابلیت اطمینان تجهیزات و تسهیلات نظامی با رویکرد ترکیبی شبیه سازی و الگوریتم های فرا ابتکاری، فصلنامه مدیریت نظامی، دوره ۵، ۱۲۵-۱۶۴.

[۲۲] ایرج‌پور، ع. ل، سلیمی، م. ح. (۱۳۸۵). ارائه مدلی به‌منظور تعیین سیاست نگهداری اثربخش با رویکرد پویایی سیستم، مجله دانش مدیریت، شماره ۷۴. ۱۲۳-۱۵۷.

[۲۳] اسماعیلیان، غ. ل؛ لورک زاده، ف؛ زارعیان، ر. (۱۳۹۴). ارزیابی و مقایسه اثربخشی پیاده سازی نت اصلاحی و نت پیشگیرانه با پویایی‌شناسی سیستم ها (مطالعه موردی: شرکت سیمگان)، مدیریت صنعتی، دوره ۷، ۱۸۹-۲۱۴.

[24] Jamshidi, A., Abbasgholizadeh Rahimi, S., Ait-kadi, D., Ruiz A. (2015). An Intelligent Healthcare Management System: A New Approach in Work-order Prioritization for Medical Equipment Maintenance Requests. *Journal of Medical Systems*. 36(2), pp557-567.

[25] Bivona, E., & Montemaggiore, G. B. (2005, July). Evaluating fleet and maintenance management strategies through system dynamics model in a city bus company. In International System Dynamics Conference, *Boston*, MA. pp. 17-21.

[26] Olive, R. (2003). Model calibration as a testing strategy for system dynamics models. *European journal of* Operational *Reasearch*. 151, Pages: 552-568.

[27] Deenen, R. E. M., Van Daalen, C. E., & Koene, E. G. C. (2008, July). Maintenance performance improvement with system dynamics: a corrective maintenance showcase. In Proceedings of the 26th International Conference of the System Dynamics Society, Athens, Greece, 20-24.

[28] Bohm, T., Beck, K., Knaak, A., & Jager, B. (2008). Efficient maintenance strategy through System Dynamics. *In Eleventh International Conference on* Computer *System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems (COMPRAIL8)*.

[29] Chumai, R. (2009, July). System Dynamic Modeling of Plant Maintenance Strategy in Thailand. In Proceedings of the 27th International Conference of the System Dynamics Society, Albuquerque (pp. 26-30).

[30] Hamdi, N, Oweeis R, Zraiq H, Summour D, (2012). An intelligent healthcare management system: A New Approach in work-order prioritization for medical Equipment maintenance request. *Journal of Medical Systems*, 36(2), pp 557-567.

[31] Basirat, P., Fazlollahtabar, H. & Mahdavi, I. (2013). System dynamics meta-modelling for reliability considerations in maintenance, Process *Management and Benchmarking*, 3(2): 136–153.

[32] Rezaie, F ,Fakoor Saghih, A, Motahari,N, (2020). A novel hybrid approach based on CREAM and fuzzy ANP to evaluate human resource reliability in urban railway, *journal of Transportation Safety & Security*, DOI: 10.1080/19439962.2020.1738611.

[33] Ventana,(2003), User interface authoring tool for Vensim, Systems Inc, issue 3.

[34] Anand S, Vrat P, Dahiya R.P. *(2006),* Application of a System Dynamics Approach for Assessment and Mitigation of CO2 Emissions from the CementIndustry. *Journal of Environmental Management*, 79, 383 -398.

[35] *Streman, Business Dynamics, (2001)*, System Thinking and Modeling for a Complex World, McGraw-*Hill 4,86-90,599-600,241-249,853-855*.

Evaluating and Controlling the Factors Affecting Equipment Reliability Improvement using Systems Dynamic Simulation (Case study: Ghaen Cement Factory)

Azam Modares
PhD Candidate- Operations Research, Department of Management, Faculty of Economics and Adminstrative, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. azam.modares@mail.um.ac.ir

Vahide Bafandegan emroozi
PhD Candidate- Operations Research, Department of Management, Faculty of Economics and Adminstrative, Ferdowsi University of Mashhad. Iran. Vahide.bafandeganemroozi@mail.um.ac.ir

Zahra Mohemmi
PhD Candidate- Public Administratio, Department of Management, Faculty of Economics and Adminstrative, University of Sistan and Baluchestan. Iran. mohemi2005@gmail.com.

Extended Abstract

Nowadays, one of the basic foundations in the industry and production is undoubtedly equipment and machinery. On the other hand, increasing productivity will not be possible without increasing the usability and utilization time of equipment and machinery. Today, with human progress in various fields of knowledge, the needs of industries have changed, and the concepts of reliability and availability have found a special place in industrial systems. Increasing the level of reliability and availability of their equipment is one of the goals of industrial organizations. In any modern society, engineers and technical managers are responsible for planning, designing, building, and operating from the simplest product to the most complex systems. The failure of products and systems disrupts various levels and can even be considered a serious threat to society and the environment.

For this reason, consumers and society at large expect products and systems to be reliable, trustworthy, and secure. Therefore, instead of focusing on reducing costs, we should focus on increasing reliability. The cement industry is now increasingly competitive. Designers and manufacturers of production equipment to increase the production capacity of machinery and compete with other manufacturers of production machinery have turned to the design of complex and low-energy machinery to reduce production costs. With increasing dependence on complex and low-consumption machinery, the issue of the ability to ensure the performance of industrial machinery becomes more significant. At this time, to control and manage equipment repair costs and also to find ways to increase their useful life and prevent production shutdowns due to equipment failure and eliminate its adverse effects, the study of factors affecting the reliability of equipment seems useful.

Reliability is particularly significant in continuous manufacturing systems where the failure of some components will cause the entire system to malfunction and cause the total system to shut down. Therefore, it is necessary to identify all the factors affecting the system reliability to prevent many problems of system failure. Reliability assessment is very important in industries with continuous processes such as the cement industry, in which every hour of downtime in the production process causes a lot of damage. To increase reliability, while emphasizing the correction of accidental breakdowns and unexpected equipment malfunctions, so far with the proper use of science, statistics and probabilities and operational research, simulation, engineering economics Queue theory,

techniques for different modes of devices and equipment, have been developed. Studies on improving reliability are extensive. Much of the research in this area has been on allocating redundancy or increasing reliability based on maintenance strategies. In redundancy allocation problems, mathematical modeling is used to maximize reliability.

Usually, the models used for redundancy allocation and reliability-based maintenance focus on only a small number of variables, and a large number of important variables, including the role of equipment operator and human reliability, are neglected. Therefore, this article tries to create a model that includes all the factors affecting the reliability of cement equipment. Given that the relationship between variables and factors affecting reliability has a lot of dynamics and feedback, system dynamics is a good tool for analyzing factors affecting reliability. System dynamics is used as a method to study the dynamic behavior of the system by emphasizing the relationships between the components of the system. By simulating and analyzing system behavior using various hypotheses, this method provides feedback to policymakers on the impact of policies so that they can make policies efficiently and effectively.

Mathematical models are flawed because they do not take into account feedback loops, while dynamic systems solve this problem and are more effective when making decisions. In other words, in dynamic models, paying attention to the time dimension and the feedback between the model variables and paying attention to the multiple relationships between the variables, takes the traditional models out of static state and their ability to predict. In this way, it is possible to evaluate and control the reliability of the equipment and fill the existing vacuum with a systemic approach. In this research, an attempt has been made to identify the factors affecting the reliability of Ghaen Cement Factory equipment. For this purpose, first, the behavior of variables related to a period and affecting the reliability of equipment was analyzed and evaluated simultaneously with obtaining an expert opinion and studying identification sources. After identifying the problem variables, the dynamic nature of the problem was presented in the form of feedback loops by identifying the relationships of the variables. After identifying the subsystems, feedback was generated in each subsystem. After identifying the key variables and finding the causes of these variables, a causal-circular diagram was drawn. Putting together dynamic hypotheses, the general structure of the dynamic model of the problem was introduced as follows. These two subsystems are connected by the variable of staff training and total cost. After identifying the factors and variables as well as the formation of cause and effect relationships between them in the form of a dynamic hypothesis, the accumulation and flow diagrams were drawn. Flowcharts are useful for representing physical or information flows in a system dynamics model. State variables are represented as rectangles that represent the accumulated currents at that surface. In other words, state variables aggregate the results of actions within a system.

Accumulations in this model (mode variables) include total reliability, net-based reliability, equipment design reliability, humanity reliability, profit, staff skills, broken equipment, discovered defects, quality improvement program, again Labor, waste, and product price. The most important variables of reliability improvement rate include failure rate, repair rate, defect correction rate, defect detection rate, humanity capacity increase rate, human cognitive error rate, employee skill increase rate, staff capacity reduction rate, the rate of correction of defects, the rate of repairs performed. By completing the model simulation and also entering the relationship between the variables in the

Vensim software, the model outputs were obtained by performing the simulation. This simulation has been performed over a five-year time horizon.

It can be seen that the quality of the process maintenance system has increased from 25 units at the beginning of the simulation period to about 180 units at the end of the period. Staff skills, as one of the effective factors in improving a maintenance system, have also grown during the simulation period. So that from about 600 units at the beginning of the period to about 2260 units at the end of the period. The failure rate, as an exponential distribution function, has been decreasing, from about 0.9 at the beginning of the first month to about zero at the end of the simulation period. The number of equipment and machinery failures has been linear and decreasing. This rate has risen from about 60 cars at the beginning of the first month to about zero cars at the end of the simulation period.

In this study, the data of the last three years have been used to examine the validity of the designed model in more detail. Production and sales volumes of the product are in tons.

As can be seen, the simulated results of the variables of production, sales, and number of customers are very close to the actual results. This indicates that the behavior of the studied variables is well simulated. Therefore, due to the small difference between real and simulated data, the validity of the model can be understood. This study states that if the variables affecting reliability are changed, such as the level of staff training, resources allocated to preventive maintenance, the quality of maintenance and repairs, etc., reliability will increase significantly. At the end of the simulation period, the total reliability has reached about 700,000, the repair and maintenance reliability has reached about 600,000, and the humanity reliability has reached 3500 units. The model presented in this research is more complete than previous models in terms of modeling, but it can be improved by adding other subsystems and adapting to the industry. Reliability of equipment design has a great role in the performance and reliability of all equipment. In this study, the related variables are not fully identified and the model can be improved by identifying more variables. Also, by defining new variables such as comprehensive productivity notes and predictive notes, it completed the note-related subsystem. By adding more variables to the initial model, it makes the model's behavior closer to reality and managers can make better strategic decisions.