

تخمین دسترس پذیری ماشین فرز CNC با استفاده از زنجیره مارکوف

حجت اله آدمی

دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

عباس راد*

(نویسنده‌ی مسؤل) استادیار دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهیدبهبشتی، a-raad@sbu.ac.ir

اکبر عالم تبریز

استاد دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهیدبهبشتی، a-tabriz@sbu.ac.ir

حسین گودرزی

کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه کار قزوین H.Godarzi@gmail.com

چکیده: ماشینکاری دقیق قطعات پیچیده صنعتی به دستگاه‌های خاصی نیاز دارد که یکی از بهترین این دستگاه‌ها ماشین فرز CNC است. این ماشین‌ها انعطاف پذیری، دقت مداوم و بهره وری بالا در تولید دارند. خرابی ماشین‌ها می‌تواند باعث توقف خط تولید شود، ضمن اینکه تعمیرات این دستگاه‌ها وقتی بدون احتمال قبلی خراب شوند و تهیه قطعات یدکی با توجه به نیاز به واردات آنها، زمانبر و هزینه‌بر است. در این مقاله خرابی دستگاه به صورت سالیانه، از خرابی‌های ثبت شده در برگه‌های تعمیرات و کنترل دستگاه که توسط پرسنل نگهداری و تعمیر تهیه شده‌اند، استخراج شده است. سپس با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف، برای تخمین قابلیت اطمینان، قابلیت-نگهداری و تعمیرات و دسترس پذیری دستگاه فرز CNC چهارمحور در سال ۱۳۹۰ استفاده گردید. سپس این اطلاعات به عنوان مبنایی برای پیاده‌سازی روش نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) و محاسبه دسترس پذیری برای سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۱ در نظر گرفته شد. نتایج پیاده‌سازی در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۱، با شاخص‌های سال ۱۳۹۰ مقایسه گردید. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که دسترس پذیری دستگاه از ۹۶/۳٪ در سال ۱۳۹۰، به ۹۹/۲۸٪ در سال ۱۳۹۷ افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: قابلیت دسترس پذیری، قابلیت تعمیر و نگهداری، زنجیره مارکوف، قابلیت اطمینان

۱- مقدمه

تدوین یک برنامه‌ی نگهداری و تعمیر موثر، لازم است که با استفاده از داده‌های خرابی جمع‌آوری شده، قابلیت اطمینان و دسترس پذیری را با دقت مناسبی در آینده پیش‌بینی کنیم تا بتوانیم بر مبنای این پیش‌بینی‌ها، برنامه‌های نگهداری و تعمیر را تهیه کنیم. برای کرد. برای جمع‌آوری داده‌های خرابی و زمان تعمیر می‌توان از منابع مختلفی استفاده کرد؛ شامل داده‌های جمع‌آوری شده در کارت‌های کنترلی سوابق گذشته‌ی دستگاه، پیش‌بینی دسترس پذیری آینده، استفاده از زنجیره‌ی مارکوف، روش مناسبی است. تحلیل مارکوف نوعی مدل‌سازی ریاضی است که وضعیت‌های خرابی آن فقط بستگی

ماشین فرز CNC چهار محور دستگاهی مهم و کلیدی در صنایع تولیدی است. خراب شدن ماشین فرز باعث توقف کل فرایند تولید می‌شود و عدم دسترسی به یک برنامه مدون نگهداری و تعمیر، موجب ایجاد خرابی‌های پیش‌بینی نشده در دستگاه شده که می‌تواند در فرایند تولید اختلال به وجود آورد. بنابراین نیاز است دسترس پذیری و قابلیت اطمینان دستگاه، از داده‌های خرابی جمع‌آوری شده محاسبه شود و برنامه‌ی نگهداری و تعمیر مناسب تدوین و اجرا شود. برای

Corresponding author: a-raad@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰

دوره ۱۱/ شماره ۲

صفحات ۱۰۷-۱۲۶

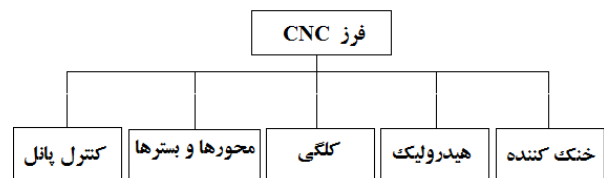
اثرات مخرب رطوبت، زنگ زدگی و اسیدها (عوامل محیطی) بر روی اجزاء دستگاه را بر عهده دارد. کنترل پنل، کنترل اجزاء مکانیکی را با کنترل جریان و ولتاژ انجام می دهد. سیستم خنک کننده وظیفه انتقال مایع خنک کننده روی ابزار و قطعه کار را در دستگاه بر عهده دارد. مجموعه ی بستر و محورها حرکت قطعه کار را در چهار محور شامل سه حرکت انتقالی در جهت های Z, X, Y و چرخش حول محور (Θ_Y) را تأمین کرده و اسپیندل دستگاه نیز عملیات چرخش قطعه کار و عملیات ماشین کاری قطعات را انجام می دهد. قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیر و دسترس پذیری، شاخص های اصلی در نگهداری و تعمیرات دستگاه فرز CNC بوده و تأثیر عمده ای بر روی هزینه در چرخه عمر هر محصول دارند.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در تحقیقات مختلف به منظور تعیین قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیر و دسترس پذیری از روش های مختلفی استفاده شده است. برخی از این روش ها عبارت اند از: درخت رویداد^۱، تحلیل درخت خطا^۲، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)^۳، سنجش قابلیت اطمینان فازی^۴ و مدل سازی مارکوف^۵. سیستم های پیوسته قابل نوسازی یا تعمیرپذیر با استفاده از فرایندهای تصادفی مانند مارکوف و نیمه مارکوف شبیه سازی می شوند. مبنای تحلیل مارکوف برپایه مدل سازی ریاضی است که وضعیت های خرابی آن فقط بستگی به وضعیت فعلی (جاری) نمونه دارد. در این تحلیل، یک ماتریس انتقال تشکیل می شود که ارتباط دهنده ی وضعیت جاری و وضعیت بعدی یعنی آینده با نرخ خرابی/تعمیر ثابت است. بیشتر اجزاء الکترونیکی با نرخ خرابی ثابتی خراب می شوند؛ بنابراین با استفاده از زنجیره مارکوف قابل مدل سازی هستند. آنیل کومار آگراوال و دیگران از مدل مارکوف برای تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه حفر تونل راه سازی (EPBTBM) استفاده کردند، آنها با انجام محاسباتی، دسترس پذیری دستگاه حفر تونل را از ۶۱٪ با نگهداری و تعمیر و برنامه ریزی مناسب به ۷۰٪ افزایش

به وضعیت حال (جاری) نمونه دارد و بر اساس آن می توان آینده را پیش بینی سوابق ثبت شده از فعالیت های نگهداری و تعمیر، تحلیل های صورت گرفته در زمینه نگهداری و تعمیر، تست های قابلیت اطمینان و تست های شتابدار عمر.

ارزیابی قابلیت اطمینان به دو روش صورت می گیرد؛ انجام آزمون های قابلیت اطمینان و ارزیابی آماری بر اساس داده های جمع آوری شده. در هر دو روش، ارزیابی بر اساس داده های خرابی حین آزمون های قابلیت اطمینان یا داده های خرابی جمع آوری شده در حین کار با دستگاه صورت می گیرد. به دلیل هزینه ی بالای انجام آزمون های قابلیت اطمینان، شرکت ها ترجیح می دهند که با استفاده از داده های آماری جمع آوری شده از خرابی های قسمت های مختلف دستگاه در یک بازه ی زمانی مشخص، قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیر و دسترس پذیری را بدست آورند و بر این اساس برنامه های نگهداری و تعمیرات لازم برای حفظ یا بهبود دسترس پذیری دستگاه را تدوین کنند [۱]. در بازار رقابتی امروزی، تولید و تحویل به موقع محصول به مشتری از ضروریات بقای هر سازمان تولیدی است. خرابی تجهیزات تولید باعث توقف خط تولید و در نتیجه نارضایتی و از دست دادن مشتری می شود. تهیه قطعات یدکی با توجه به نیاز به واردات آنها، زمانبر است، بنابراین وقتی این دستگاه ها بدون هشدار و پیش آگهی قبلی خراب شوند، ممکن است مدتی طولانی خط تولید متوقف شده و هزینه ی زیادی بر صنعت تحمیل شود. این عوامل موجب می شود که دسترس پذیری دستگاه فرز، دغدغه اصلی مدیران صنایع باشد و موضوع قابلیت اطمینان در برنامه تحقیقاتی شرکت های صنعتی قرار گیرد. زیرسیستم های اصلی دستگاه فرز CNC شامل؛ سیستم هیدرولیک (Hydraulic System)، خنک کننده (Cooling)، کنگی و اسپیندل (Spindle)، محورها و بسترها (Bed & Axis) و کنترل پانل (Panel Control) است (شکل ۱).



شکل ۱: زیر مجموعه های اصلی دستگاه فرز CNC

وظیفه سیستم هیدرولیک و پنوماتیک، انتقال حرکت و تأمین نیرو با استفاده از سیال و هوای فشرده است. سیستم روغن کاری، وظیفه ی کاهش اصطکاک بین قطعات و ممانعت از

¹ Event Tree

² Fault Tree Analysis

³ Reliability Center Maintenance

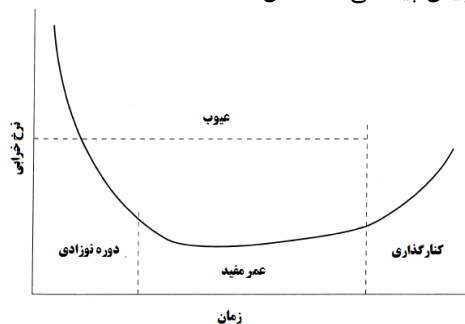
⁴ Fuzzy Reliability Measure

⁵ Markov Modeling

داده‌اند و این کار را بوسیله‌ی نگهداری و تعمیر پیشگیرانه انجام داده‌اند. در این تحقیق داده‌های تحلیل در یک بازه زمانی کوتاه جمع‌آوری شده‌اند اما مقایسه‌ای بین شاخص‌های MTBF و MTTR بررسی نشده است ضمناً آنها روش معمول نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه را پیشنهاد داده‌اند و درباره روش RCM و کارآمدی آن، بررسی و تحقیقی انجام نداده‌اند [۲]. کالایاراسی و همکاران، محاسبه قابلیت اطمینان بر اساس نرخ خطای انسانی با استفاده از زنجیره مارکوف را انجام دادند و از این روش برای کمک به بهبود اثر بخشی سلامتی و ایمنی نیروی انسانی و دستگاه‌ها استفاده کرده‌اند [۳]. زائوجون یانگ و همکاران مدل‌سازی قابلیت اطمینان ماشین‌ابزار CNC بر اساس روش برآورد حداکثر را ارائه دادند و درخصوص موضوعات نگهداری و تعمیرات و ارتباط آن با بهبود قابلیت اطمینان دستگاه‌ها بحثی ارائه نداده‌اند [۴]. واشیمکار و همکارانش نگهداری و تعمیر پیشگیرانه را بر اساس خرابی پیش‌گیرانه، شناسایی شروع خرابی و کشف خرابی ناگهانی برای دستگاه خاک برداری حفاری فرموله کردند و برای قطعات بحرانی مانند چنگک و سیم بکسل برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه انجام داده‌اند و قابلیت اطمینان این قطعات به ترتیب ۴۰/۶۵٪ و ۳۷/۹٪ بهبود داشته است اما در خصوص دسترس‌پذیری دستگاه و برنامه‌ها و اقدامات آتی تحقیقی صورت نگرفته است [۵]. سنجش قابلیت اطمینان فازی روش دیگری برای محاسبه‌ی قابلیت اطمینان محصولات الکترومکانیکی است. در روش فازی، قابلیت اطمینان بصورت ترکیبی از متغیر تصادفی و فازی به-دست می‌آید، لینگ لی و همکاران، مدل سنجش قابلیت اطمینان را برای محصولات الکترومکانیکی تحت اثر چندین نوع عدم قطعیت، مورد مطالعه قرار دادند و روش ارائه شده را با مدل‌های فازی و تصادفی جداگانه مقایسه و صحت‌گذاری کرده‌اند، این مدل روش مناسبی در محاسبه‌ی قابلیت اطمینان محصولات الکترومکانیکی در شرایط تعریف شده است [۶]. مشکلات کنترل سیگنال ترافیک در سطح شهر با استفاده از فرایند مارکوف به‌وسیله یانون زو و همکاران، مورد بررسی قرار گرفته است، نتایج این بررسی نشان می‌دهد که این روش به ویژه در شرایط ترافیک سنگین بهتر از روش کنترل معمول است و مقاله، کاربردی از زنجیره‌ی مارکوف را بیان می‌کند [۷]. ژئو-جونگ و همکاران بهینه‌سازی سیاست‌های نگهداری به منظور بهبود قابلیت اطمینان دستگاه ماشین‌کاری را بررسی کردند، در این مقاله داده‌های

خرابی دوازده دستگاه ماشین فرز در مدت پنج سال جمع‌آوری شده است و پس از تحلیل خرابی اجزاء دستگاه برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بصورت دوره‌ای و متوالی (روزانه و ..) پیشنهاد شده است، در این مقاله در خصوص دسترس‌پذیری دستگاه و شاخص‌های MTBF و MTTR مطالعه‌ای صورت گرفته است [۸]. ینگ ژئو و همکاران به ارائه‌ی روشی برای حذف خطاهای ناشی از برخی داده‌های غیرطبیعی در آزمون قابلیت اطمینان پرداخته‌اند و داده‌های خرابی نگهدارنده‌ی ابزار دستگاه تراش CNC (تارت) برای بررسی اعتبار روش ارائه شده، مورد مطالعه قرار گرفته است، سپس با داده‌های باقیمانده، قابلیت اطمینان دستگاه تحلیل شده و MTBF محاسبه شده است، اما بحثی از تأثیر روش مناسب نگهداری و تعمیرات بر دسترس‌پذیری و بهبود قابلیت اطمینان نشده است [۹]. لاد و کولکاری از دانش و تجربه پرسنل تعمیر و نگهداری برای برآورد توزیع زمان تا خرابی قطعات قابل تعمیر و غیرقابل تعمیر ماشین ابزار در نبود داده‌های خرابی میدانی استفاده کردند و اعتبار روش پیشنهادی با بررسی دو مثال در صنعت بررسی شده است، انتظار می‌رود که این روش مشکل دسترسی داده‌ها را کاهش داده و به طراحان در استفاده از رویکردهای بر پایه‌ی قابلیت اطمینان، در طراحی ماشین‌ها کمک کند [۱۰]. کمیته‌ی بین‌المللی الکترونیک کاربرد زنجیره‌ی مارکوف در قابلیت اعتماد را مورد بررسی قرار داده است، در این استاندارد، کلیات، مفروضات و معادلات حاکم به منظور محاسبه‌ی شاخص‌های نگهداری و تعمیر MTBF و MTTR بیان شده است [۱۱]. جولوان هندری پاربا، جی لو و همکاران، ارزیابی قابلیت اطمینان را با استفاده از متغیرهای زبانی کیفی برای دستگاه‌هایی که داده‌های خرابی و تاریخچه داده‌ها در دسترس نبوده با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی و استخراج خرابی رویدادهای پایه انجام دادند و شکاف تحقیقاتی در خصوص استفاده از این روش در بهبود دسترس‌پذیری و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات وجود دارد [۱۲]. هوای وی لو و همکاران مدل جدیدی برای تحلیل حالات خرابی و اثرات، به منظور تحلیل ریسک ماشین ابزار، ارائه دادند، مدل ارائه شده ترکیب روش FMEA با معیار چندشاخصه‌ی تصمیم‌گیری تاپسیس و استفاده از متغیرهای زبانی کیفی برای شناسایی خرابی‌های ریسک‌های ماشین‌ابزار است و در خصوص استفاده از این مدل در برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات و قابلیت اطمینان دستگاه، تحقیقی صورت

قابلیت اطمینان، رویه‌ی برنامه‌ی نگهداری مناسبی باید شکل بگیرد و تعمیر و نگهداری، بر طبق برنامه انجام شود. برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ماشین فرز CNC دو روش شامل بازرسی روزمره و روش دارای رویه وقاعده وجود دارد. در بازرسی روزمره، کفایت مواردی همچون روغن کاری، مایع خنک کننده، بازدید پیچ‌ها (مثلاً میزان لقی آن روی اسپیندل و کلگی) و نشستی روغن چک می‌شود. در بازرسی قاعده مند و برنامه‌ریزی شده بازرسی کامل زیر سیستم‌ها مانند اسپیندل، سیستم خنک‌کننده، هیدرولیک، سیستم کنترل، محورها و بسترها انجام می‌شود. در این مطالعه لازم است چارچوب مناسبی برای تحلیل میانگین زمان بین خرابی‌ها و میانگین زمان تا تعمیر بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده و تحلیل روند ایجاد شود تا با اجرای اقدامات پیشگیرانه‌ی پیشنهادی، بهبود در قابلیت اطمینان زیر سیستم‌ها و کل دستگاه فرز ایجاد شود. میلتن و همکاران، بیان کردند که رفتار اجزاء، قطعات و تجهیزات در یک یا چند دوره از منحنی نرخ خرابی با زمان که به منحنی وان حمامی شناخته شده است، قرار می‌گیرند. این منحنی دارای سه مرحله خرابی در دوره نوزادی، دوره عمر مفید و دوره کنارگذاری (پیری) است. در دوره نوزادی نرخ خرابی زیاد بوده و در دوره عمر مفید نرخ خرابی ثابت است و در مرحله آخر به دلیل فرسودگی، نرخ خرابی افزایش پیدا می‌کند (شکل ۲) [۱۶]



شکل ۲: منحنی وان حمامی (نرخ خرابی - زمان) [۱۶]

هنگامی که دستگاه در دوره عمر مفید کار می‌کند، میانگین زمان بین خرابی‌ها با نرخ خرابی رابطه عکس دارد و یا معادل نسبت زمان کارکرد مفید دستگاه به تعداد خرابی‌ها است. میانگین زمان تا تعمیر، بیانگر زمان صرف شده برای تعمیر پس از خرابی است و به صورت نسبت زمان توقف به تعداد خرابی‌ها بیان می‌شود. معادلات و روابط حاکم بر مسئله به صورت زیر هستند:

نداده‌اند [۱۳]. حامد فضل‌اله تبار و سیدتقی اخوان نیکی، ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم پیچیده با استفاده از تحلیل درخت خطا را انجام دادند، محققین در این مقاله با استفاده از روش تحلیل درخت خطا (FTA) احتمال خرابی اجزاء ربات صنعتی را به دست آورده‌اند و بر اساس نمودار ترسیم شده برای درخت خطا، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان ترسیم شده است و سپس محاسبه قابلیت اطمینان انجام شده است، در این مقاله روشی برای بهبود قابلیت اطمینان و برنامه نگهداری و تعمیرات ربات و دسترس پذیری ارائه نشده است [۱۴]. راج کومار و همکاران از داده‌های زمان تا خرابی و زمان تا تاخیر برای تخمین شاخص‌های نگهداری و تعمیرات دستگاه تراش CNC استفاده کرده‌اند و با برنامه‌ریزی مناسب نگهداری و تعمیرات قابلیت اطمینان ماشین CNC حدود ۴۵٪ افزایش داشته است و هزینه‌های اولیه‌ی بهبود ۲۵٪/روند افزایشی داشته ولی در عوض هزینه کل در چرخه عمر ۲۵٪ کاهش یافته است [۱۵]. ما در این مقاله به دنبال پرکردن شکاف تحقیقاتی در خصوص بهبود قابلیت اطمینان و دسترس پذیری دستگاه فرز CNC با پیاده‌سازی روش نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان به کمک داده‌های خرابی دستگاه، برای یک دوره زمانی هفت ساله و تحلیل شاخص‌های MTBF، MTTR و دسترس پذیری با استفاده از زنجیره مارکوف هستیم.

۳- روش پژوهش

هنگامی که یک تجهیز، در انجام وظیفه‌ی رضایت‌بخش، با مشکل مواجه شود، گفته می‌شود که خراب شده است. نرخ-خرابی (λ) یک تجهیز، ذاتاً با قابلیت اطمینان (R) آن ارتباط دارد و این مشخصه‌ای است که از یک جزء به جزء دیگر متغیر است، حتی اگر فرض کنیم که اجزاء مشابه هستند. قابلیت اطمینان محصول/سیستم، اهمیت بسیاری در داشتن سهم از بازار رقابتی امروزی و پایدار بودن آن دارد. تحلیل قابلیت اطمینان، کمک می‌کند تا خرابی‌های محصول/سیستم را مدیریت کنیم. زیر سیستم‌های اصلی ماشین فرز در هنگام استفاده ممکن است خراب شوند. به عبارتی به منظور تضمین

⁶ Fault Tree Analysis

⁷ Failure Rate

⁸ Reliability

• خرابی همزمان برای زیرسیستم‌ها وجود نداشته و احتمال بیشتر از یک خرابی یا تعمیر در یک زمان معین صفر است.

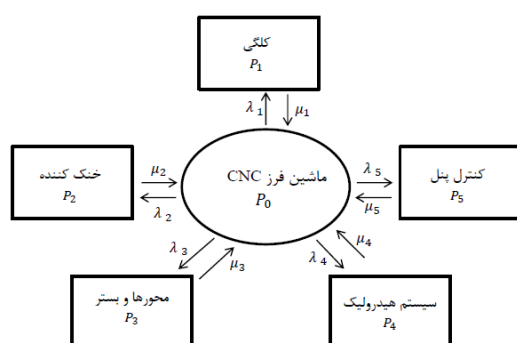
• خرابی‌های غالب در مجموعه‌های اصلی، شامل نقص در موتور اینکودر محورها و بستر، خوردگی بیرینگ‌ها و لاینر راهنما، نقص در سیستم‌روغن‌کاری و خرابی کُلگی است.

• قطعات قابل تعمیر زیر سیستم‌های ماشین‌فرز، تعمیر و یا با قطعات جدید جایگزین می‌شوند.

• زیر سیستم‌های ماشین‌فرز دارای دو حالت هستند یا در حال کارکردن (انجام وظیفه) یا عدم انجام وظیفه. وقتی ماشین از حالت عدم انجام وظیفه (دسترس‌ناپذیر) به حالت کارکردن (دسترس‌پذیر) می‌رسد؛ نشان‌دهنده‌ی این است که تعمیر/تعویض انجام شده است، در حالی که ماشین از حالت کارکردن (دسترس‌پذیر) به حالت عدم انجام وظیفه (دسترس‌ناپذیر) برسد نشان‌دهنده‌ی خراب‌بودن زیرسیستم است. احتمال‌گذار از حالت جاری به حالت بعدی، بستگی به کارکرد حالت قبلی ندارد، بلکه به حالت فعلی بستگی دارد و دیاگرام حالت گذار بدون حافظه است حتی اگر سامانه واقعی این‌گونه نباشد.

۳-۲- دیاگرام گذار و مدل‌سازی مارکوف

دیاگرام‌گذار برای ماشین‌فرز بر اساس (RBD)، در شکل (۴) نشان داده شده و حالت وظیفه‌ای با ۰ و حالت خراب با (i=1,2,3,4,5) نشان داده شده است.



شکل ۴: دیاگرام حالت‌گذار ماشین و زیر مجموعه‌های اصلی آن

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (۱)$$

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (۲)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (۳)$$

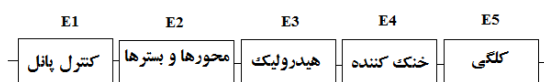
$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (۴)$$

$$A(t) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (۵)$$

که در آن؛ $R(t)$: قابلیت‌اطمینان ماشین، λ نرخ‌خرابی، $M(t)$ قابلیت‌نگهداری و تعمیر، μ نرخ‌تعمیر، $A(t)$ دسترس‌پذیری، $MTTF$ (متوسط زمان تا خرابی) و $MTTR$ (متوسط زمان تا تعمیر) است.

مدل‌سازی مارکوف به منظور شبیه‌سازی فرایند تصادفی (دارای تغییر در مواقع مختلف) که دارای نرخ‌خرابی و نرخ‌تعمیر ثابتی باشند، به‌کار می‌رود و روش مناسبی است برای محاسبه مقادیر $R(t)$ ، $A(t)$ ، $M(t)$ برای سیستم‌های تعمیرپذیری که زمان توقف آنها تابع توزیع‌نمایی باشد.

برای محاسبه قابلیت‌اطمینان ماشین‌فرز، بلوک‌دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD)^{۱۱} ماشین‌فرز برای زیر مجموعه‌های اصلی آن که بصورت سری با هم ارتباط دارند، ترسیم شده است (شکل ۳).



شکل ۳: بلوک‌دیاگرام قابلیت‌اطمینان زیر مجموعه‌های اصلی فرز CNC

۳-۱- فرضیات مدل‌سازی مارکوف

- حالت‌گذار^{۱۲}؛ عبارتست از تغییر از یک حالت به حالت دیگر، معمولاً به عنوان نتیجه‌ای از خرابی یا بازیابی
- نرخ‌تعمیر (μ) و نرخ‌خرابی (λ) زیر سیستم‌ها در طول زمان ثابت بوده و به‌صورت آماری مستقل از هم هستند.
- داده‌های $MTTF$ و $MTTR$ دارای توزیع‌نمایی هستند.

⁹ Mean Time to Failure

¹⁰ Mean Time to Repair

¹¹ Reliability Block Diagram

¹² Transition

در حالت گذار برای شکل (۴) روابط زیر را داریم:

$$\lambda_1 P_0 = P_1 \mu_1$$

$$\lambda_2 P_0 = P_2 \mu_2$$

$$\lambda_3 P_0 = P_3 \mu_3$$

$$\lambda_4 P_0 = P_4 \mu_4$$

$$\lambda_5 P_0 = P_5 \mu_5$$

و در روابط بالا جمع احتمال P_i برابر یک است پس رابطه زیر را می توانیم بنویسیم:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1 \rightarrow P_0 = \frac{1}{1 + \sum \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \quad (11)$$

۴- یافته ها

ماشین فرز و زیرمجموعه های آن با یک پیکربندی سری با هم یک سیستم را شکل می دهند که دارای رابطه تعاملی با هم هستند. فرمول های ارائه شده ی بالا، برای حالت گذار بوده و دسترس پذیری ماشین با استفاده از آنها محاسبه می شود. نرخ خرابی و تعمیر بر اساس داده های ثبت شده برای مجموعه های اصلی ماشین برای سال ۱۳۹۰، در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۱- نرخ خرابی و نرخ تعمیر ماشین فرز CNC در سال ۱۳۹۰				
حالت انجام وظیفه	نرخ خرابی (نرخ خرابی بر ساعت کارکرد)	نرخ تعمیر (نرخ تعمیر بر ساعت کارکرد)	احتمال	احتمال
کلیگی	۰	-----	P_1	حالت خراب
خنک کننده	۰/۰۰۲۳۰۴۶۷۸	۰/۴۱۶	P_2	حالت انجام وظیفه
محورها و	۰/۰۰۱۹۰۳۴۰۲	۰/۱۱۱	P_3	حالت انجام وظیفه
بستر			P_0	حالت انجام وظیفه
سیستم	۰/۰۰۰۹۱۷۲۲۱	۰/۲۸۵۷	P_4	حالت انجام وظیفه
هیدرولیک				حالت انجام وظیفه
کنترل پنل	۰/۰۰۰۹۲۷۲۱۴	۰/۰۷۶۹	P_5	حالت خراب

چون بررسی عمر مفید دستگاه فرز CNC مد نظر است و از طرفی محققین برای دوره عمر مفید، توزیع نمایی را پیشنهاد داده اند، از این توزیع نیز برای محاسبه ی قابلیت اطمینان استفاده شده است [۱۶]. قابلیت اطمینان زیرسیستم ها از توزیع نمایی معادله (۱) پیروی می کند:

در ابتدای روشن شدن ماشین ($t=0$)، ماشین در شرایط کاری بوده و زیر سیستم ها به حالت غیر کارکردی یا وضعیت دسترس ناپذیری می رسند و برعکس. حالت گذار نشان دهنده ی فقط دو حالت دسترس پذیری و دسترس ناپذیری است و برعکس. بر اساس دیاگرام گذار بالا، معادلات مارکوف می توانند به صورت زیر استخراج شوند:

$PS_0(t)$: احتمال دسترس پذیر بودن (s_0) ماشین فرز در زمان t
 $PS_i(t)$: احتمال دسترس ناپذیر بودن (s_i) زیر سیستم های ماشین فرز در زمان t که $i=1,2,3,4,5,6$
 احتمال اینکه ماشین فرز بعد از یک فاصله زمانی کوتاه (dt) شروع به کار نماید به صورت زیر نشان داده می شود (کومار و همکاران):

$P_{s_0}(t+dt)$ = احتمال شروع به کار ماشین فرز
 $P_{s_0}(t+dt)$ = { (احتمال انجام وظیفه در زمان t) یا (احتمال خراب نشدن در زمان $t+dt$) + { (احتمال شروع خرابی در زمان t) یا (احتمال شروع تعمیر در زمان $t+dt$) }

$$P_{s_0}(t+dt) = [P_{s_0}(t)\{1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)dt\}] + [P_{s_1}(t)\mu_1 dt + P_{s_2}(t)\mu_2 dt + P_{s_3}(t)\mu_3 dt + P_{s_4}(t)\mu_4 dt + P_{s_5}(t)\mu_5 dt] \quad (6)$$

$$P_{s_0}(t+dt) - P_{s_0}(t) = [\{ -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)P_{s_0}(t)dt \} + [P_{s_1}(t)\mu_1 dt + P_{s_2}(t)\mu_2 dt + P_{s_3}(t)\mu_3 dt + P_{s_4}(t)\mu_4 dt + P_{s_5}(t)\mu_5 dt]] \quad (7)$$

$$\frac{P_{s_0}(t+dt) - P_{s_0}(t)}{dt} = [\{ -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)P_{s_0}(t) \} + [P_{s_1}(t)\mu_1 + P_{s_2}(t)\mu_2 + P_{s_3}(t)\mu_3 + P_{s_4}(t)\mu_4 + P_{s_5}(t)\mu_5]] \quad (8)$$

$$\frac{dP_{s_0}(t)}{dt} = P_{s_i}(t) \sum \mu_i - P_{s_0}(t) \sum \lambda_i \quad (i = 1,2,3,4,5) \quad (9)$$

برای حالت پایدار^{۱۳} مشتق مرتبه اول به سمت صفر میل می کند؛ بنابراین داریم:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1 \rightarrow P_0 = \frac{1}{1 + \sum \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \quad (10)$$

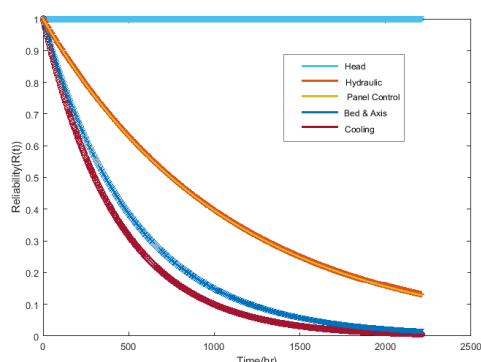
¹³ Steady state

همانطور که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان دستگاه با افزایش زمان، روند کاهشی دارد. این مقدار در نمودارها برای زمان عملکرد یکساله (۲۲۱۲ ساعت) ترسیم شده است.

جدول ۲: قابلیت اطمینان ماشین فرز CNC و مجموعه‌های اصلی در

سال ۱۳۹۰

زمان کلگی (ساعت)	خنک کننده	محورها و بستر	سیستم هیدرولیک	کنترل - پنل	فرز CNC
۰	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۰/۹۹۳۱	۰/۹۹۴۳	۰/۹۹۷۲	۰/۹۹۷۲	۰/۹۸۲۰
۶	۰/۹۸۶۲	۰/۹۸۸۶	۰/۹۹۴۵	۰/۹۹۴۴	۰/۹۶۴۳
۹	۰/۹۷۹۴	۰/۹۸۳۰	۰/۹۹۱۷	۰/۹۹۱۶	۰/۹۴۶۹
۱۲	۰/۹۷۲۷	۰/۹۷۷۴	۰/۹۸۹۰	۰/۹۸۸۹	۰/۹۲۹۹
۱۵	۰/۹۶۶۰	۰/۹۷۱۸	۰/۹۸۶۳	۰/۹۸۶۱	۰/۹۱۳۲
۱۸	۰/۹۵۹۳	۰/۹۶۶۳	۰/۹۸۳۶	۰/۹۸۳۴	۰/۸۹۶۷
۲۱	۰/۹۵۲۷	۰/۹۶۰۸	۰/۹۸۰۹	۰/۹۸۰۷	۰/۸۸۰۶
۲۴	۰/۹۴۶۱	۰/۹۵۵۳	۰/۹۷۸۲	۰/۹۷۷۹	۰/۸۶۴۷
۲۷	۰/۹۳۹۶	۰/۹۴۹۹	۰/۹۷۵۵	۰/۹۷۵۲	۰/۸۴۹۲
۳۰	۰/۹۳۳۱	۰/۹۴۴۴	۰/۹۷۲۸	۰/۹۷۲۵	۰/۸۳۳۹
۳۳	۰/۹۲۶۷	۰/۹۳۹۱	۰/۹۷۰۱	۰/۹۶۹۸	۰/۸۱۸۹
۳۶	۰/۹۲۰۳	۰/۹۳۳۷	۰/۹۶۷۵	۰/۹۶۷۱	۰/۸۰۴۲
۳۹	۰/۹۱۴۰	۰/۹۲۸۴	۰/۹۶۴۸	۰/۹۶۴۴	۰/۷۸۹۷
۴۲	۰/۹۰۷۷	۰/۹۲۳۱	۰/۹۶۲۲	۰/۹۶۱۸	۰/۷۷۴۵
۴۵	۰/۹۰۱۴	۰/۹۱۷۹	۰/۹۵۹۵	۰/۹۵۹۱	۰/۷۶۱۵
۴۸	۰/۸۹۵۳	۰/۹۱۲۷	۰/۹۵۶۹	۰/۹۵۶۵	۰/۷۴۷۹
۵۱	۰/۸۸۹۱	۰/۹۰۷۴	۰/۹۵۴۲	۰/۹۵۳۸	۰/۷۳۴۴
۵۴	۰/۸۸۲۹	۰/۹۰۲۳	۰/۹۵۱۶	۰/۹۵۱۱	۰/۷۲۱۲
۵۷	۰/۸۷۶۸	۰/۸۹۷۱	۰/۹۴۹۰	۰/۹۴۸۵	۰/۷۰۸۲
۶۰	۰/۸۷۰۸	۰/۸۹۲۰	۰/۹۴۶۴	۰/۹۴۵۹	۰/۶۹۵۴
.	۰/۸۶۴۹	۰/۸۸۷	۰/۹۴۳۹	۰/۹۴۳۳	۰/۶۸۳۰



شکل ۵: قابلیت اطمینان زیر مجموعه‌های اصلی ماشین فرز CNC در

سال ۱۳۹۰

$$R_1(t) = e^{-\lambda_1 \times t}, R_2(t) = e^{-\lambda_2 \times t}, R_3(t) = e^{-\lambda_3 \times t}, R_4(t) = e^{-\lambda_4 \times t}, R_5(t) = e^{-\lambda_5 \times t}$$

از آنجایی که ارتباط زیر مجموعه‌های اصلی ماشین فرز با هم بصورت سری است، قابلیت اطمینان کل ماشین فرز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

از آنجایی که ارتباط زیر مجموعه‌های اصلی ماشین فرز با هم بصورت سری است، قابلیت اطمینان کل ماشین فرز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{CNC \text{ Milling}}(t) = \prod_{i=1}^5 R_i(t) = e^{-\lambda_1 \times t} \times e^{-\lambda_2 \times t} \times e^{-\lambda_3 \times t} \times e^{-\lambda_4 \times t} \times e^{-\lambda_5 \times t} \quad (12)$$

قابلیت تعمیر و نگهداری زیرسیستم‌ها از معادله (۲) پیروی می‌کند:

$$M_1(t) = 1 - e^{-\mu_1 \times t}, M_2(t) = 1 - e^{-\mu_2 \times t}, M_3(t) = 1 - e^{-\mu_3 \times t}, M_4(t) = 1 - e^{-\mu_4 \times t}, M_5(t) = 1 - e^{-\mu_5 \times t}$$

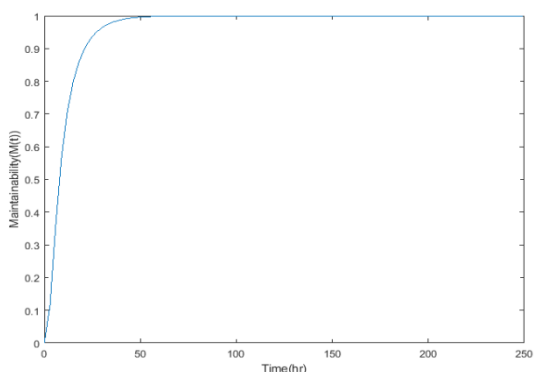
قابلیت تعمیر و نگهداری کل ماشین فرز بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M_{CNC \text{ Milling}}(t) = \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\mu_i \times t}) \quad (13)$$

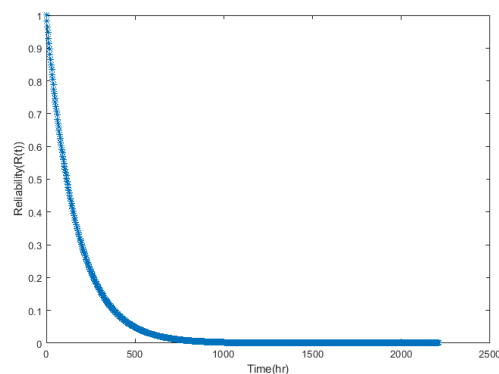
در جدول (۲) قابلیت اطمینان دستگاه و مجموعه‌های اصلی در بازه‌ی زمانی ۶۰ ساعت (زمان کارکرد دستگاه ۲۲۱۲ ساعت در سال ۱۳۹۰) نشان داده شده است و در شکل (۴) و (۵) این مقادیر برای زمان ۶۰ ساعت ترسیم شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود به دلیل اینکه زیرمجموعه‌های اصلی دستگاه فرز به صورت سری با هم ارتباط دارند، با افزایش زمان، قابلیت اطمینان دستگاه کاهش می‌یابد. همچنین همانطور که از جدول (۲) مشاهده می‌شود، قابلیت اطمینان خنک‌کننده در بازه‌ی زمانی ۶۰ ساعت نسبت به سایر مجموعه‌ها با نرخ بیشتری کاهش می‌یابد که لازم است به عنوان نقاط بهبود قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن برنامه‌های تعمیر و نگهداری انتخاب شوند. از طرفی خنک‌کننده $(R_{Colling} = 0.9332)$ دارای قابلیت اطمینان کمتری نسبت به محورها و بستر $(R_{bed \& axis} = 0.9338)$ است. سیستم هیدرولیک و کنترل پانل به دلیل داشتن نرخ خرابی نزدیک به هم، دارای قابلیت اطمینان یکسانی در بازه زمانی عملکردی هستند. در شکل (۵) قابلیت اطمینان کل دستگاه فرز در سال ۱۳۹۰ نشان داده شده است؛

جدول ۳: قابلیت نگهداری و تعمیر ماشین CNC و مجموعه های اصلی در سال ۱۳۹۰

زمان (ساعت)	کلگی کننده	خنک بستر	محورها و سیستم هیدرولیک	کنترل پنل	فرز CNC
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۱	۰/۷۱۳۵	۰/۲۸۰۲	۰/۵۷۵۶	۰/۳۰۶۱
۶	۱	۰/۹۱۷۴	۰/۴۸۱۹	۰/۸۱۹۹	۰/۳۶۹۷
۹	۱	۰/۹۷۶۵	۰/۶۲۷۰	۰/۹۲۳۶	۰/۴۹۹۶
۱۲	۱	۰/۹۹۳۳	۰/۷۳۱۵	۰/۹۸۶۲	۰/۶۰۲۷
۱۵	۱	۰/۹۹۸۱	۰/۸۰۶۸	۰/۹۹۴۲	۰/۶۸۴۶
۱۸	۱	۰/۹۹۹۴	۰/۸۶۰۹	۰/۹۹۷۵	۰/۷۴۹۶
۲۱	۱	۰/۹۹۹۸	۰/۸۹۹۹	۰/۹۹۸۹	۰/۸۰۱۲
۲۴	۱	۱	۰/۹۲۷۰	۰/۹۹۹۶	۰/۸۴۲۲
۲۷	۱	۱	۰/۹۴۸۱	۰/۹۹۹۸	۰/۸۷۴۷
۳۰	۱	۱	۰/۹۶۲۷	۰/۹۹۹۹	۰/۹۰۰۵
۳۳	۱	۱	۰/۹۷۳۱	۱	۰/۹۲۱
۳۶	۱	۱	۰/۹۸۰۷	۱	۰/۹۳۷۳
۳۹	۱	۱	۰/۹۸۶۱	۱	۰/۹۵۰۲
۴۲	۱	۱	۰/۹۹۲۸	۱	۰/۹۶۰۵
۴۵	۱	۱	۰/۹۹۶۳	۱	۰/۹۷۵۱
۴۸	۱	۱	۰/۹۹۷۳	۱	۰/۹۸۰۲
۵۱	۱	۱	۰/۹۹۸۱	۱	۰/۹۸۴۳
۵۴	۱	۱	۰/۹۹۸۶	۱	۰/۹۸۷۵
۵۷	۱	۱	۰/۹۹۹۹	۱	۰/۹۹۰۱
۶۰	۱	۱	۰/۹۹۹۵	۱	۰/۹۹۳۸

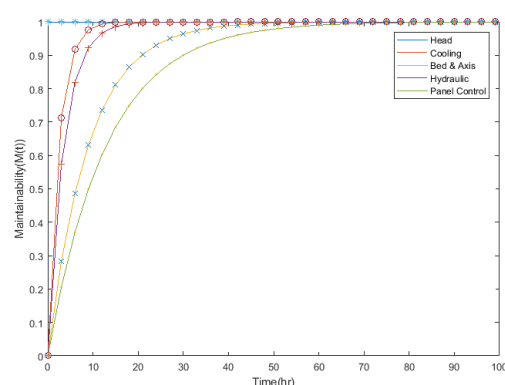


شکل ۸: منحنی قابلیت نگهداری و تعمیر ماشین فرز CNC در سال ۱۳۹۰



شکل ۶: قابلیت اطمینان ماشین فرز CNC در سال ۱۳۹۰

در جدول (۳) قابلیت نگهداری و تعمیر دستگاه و مجموعه های اصلی، در بازه زمانی ۶۰ ساعت نشان داده شده است و در شکل (۷) و (۸) این مقادیر برای زمان ۶۰ ساعت (زمان کارکرد سالیانه دستگاه ۲۲۱۲ ساعت) ترسیم شده است. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می شود، قابلیت نگهداری و تعمیر خنک کننده، نسبت به سایر مجموعه ها بهتر بوده و به آسانی برای استفاده آماده می شود. همچنین در جدول (۳) و شکل (۸) مشاهده می شود که پس از زمان ۳۳ ساعت تعمیر و نگهداری، خنک کننده و سیستم هیدرولیک دوباره به حالت اولیه خود یا ۱۰۰٪ بر می گردند. همچنین قابلیت نگهداری و تعمیرات دستگاه فرز CNC در زمان حدود ۹۳ ساعت به شرایط اولیه ۱۰۰٪ بر می گردد. نگهداری و تعمیر پیشگیرانه به افزایش قابلیت اطمینان دستگاه و زیرسیستم ها کمک می کند و در این راستا لازم است برنامه دوره ای منظم نگهداری و تعمیر پیشگیرانه (روزانه، هفتگی، ماهیانه و سالانه) به دلیل اثربخشی زیاد و جلوگیری از وقوع خرابی مجموعه های اصلی دستگاه مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۷: منحنی قابلیت نگهداری و تعمیر زیر مجموعه های اصلی ماشین

فرز در سال ۱۳۹۰

$$P_3 = \frac{\lambda_3}{\mu_3} \times P_0 = .963 \times .017147 = .01651$$

میزان دسترس‌ناپذیری کنترل پنل:

$$P_4 = \frac{\lambda_4}{\mu_4} \times P_0 = .963 \times 0.00321 = .00309$$

میزان دسترس‌ناپذیری سیستم هیدرولیک:

$$P_5 = \frac{\lambda_5}{\mu_5} \times P_0 = .963 \times .012057399 = .01161$$

از معادله مارکوف میزان دسترس‌ناپذیری مجموعه کلگی، خنک‌کننده، محورها و بستر، کنترل پنل و سیستم هیدرولیک در سال ۱۳۹۰ به ترتیب ۰٪، ۰/۵۳٪، ۰/۱۶٪، ۰/۳۱٪ و ۰/۱۶٪ است.

از دیاگرام حالت گذار شکل (۴)، معادله مارکوف، دسترس‌پذیری حالت پایدار ماشین فرز به صورت زیر تخمین زده (P_0) می‌شود:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum \frac{\lambda_i}{\mu_i}}$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + 0.00554 + 0.017147 + 0.00321 + 0.012057399}$$

$$P_0 = 0.963$$

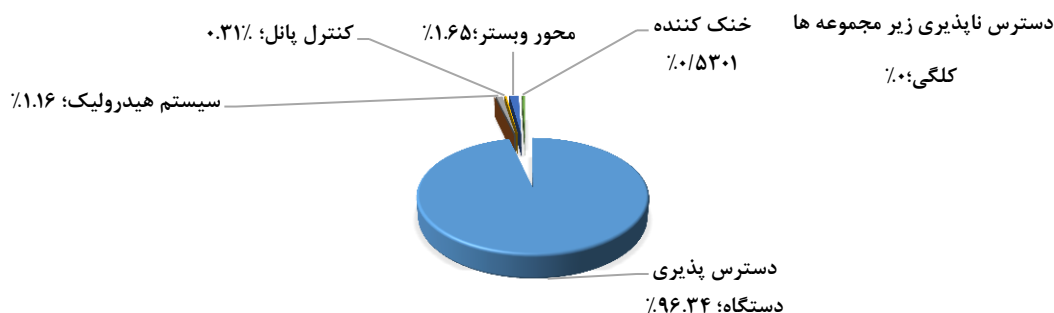
میزان دسترس‌ناپذیری کلگی:

$$P_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1} \times P_0 = .963 \times 0 = 0$$

میزان دسترس‌ناپذیری خنک‌کننده:

$$P_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} \times P_0 = .963 \times .00554 = .00533$$

میزان دسترس‌ناپذیری محورها و بستر:



شکل ۹: میزان دسترس‌پذیری و دسترس‌ناپذیری ماشین فرز CNC و زیر مجموعه‌های آن در سال

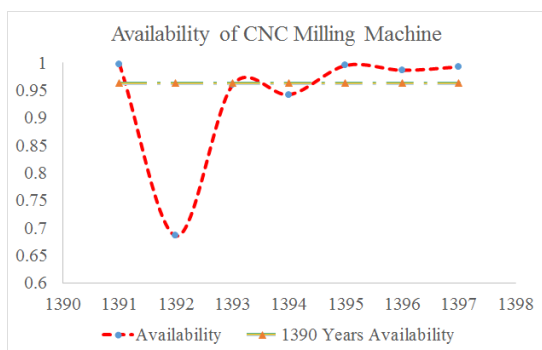
نگهداری و تعمیر، دسترس‌پذیری، قابلیت اطمینان دستگاه و مأموریت دستگاه را در جریان تولید تضمین می‌کند. این ابزار خدمات تعمیر و نگهداری و فاصله زمانی بهینه را در نظر می‌گیرد و دسترس‌پذیری دستگاه و قطعات بحرانی را میسر می‌سازد. نرخ خرابی دستگاه در بازه زمانی ۱۳۹۷-۱۳۹۱ پس از تصمیم‌گیری به پیاده‌سازی RCM مطابق جدول (۴) است. و روند دسترس‌پذیری دستگاه از سال ۱۳۹۷-۱۳۹۰ مطابق معادله (۱۱) مطابق جدول (۵) است.

همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، دسترس‌پذیری دستگاه فرز CNC برابر ۹۶/۳٪ است برای حفظ این وضعیت و دسترس‌پذیر بودن دستگاه لازم است سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری صورت گیرد.

۵- نگهداری و تعمیرات بر مبنای قابلیت اطمینان (RCM) ^{۱۴}

RCM در واقع یک ابزار کارا و کامل برای بهبود سیاست‌های مرتبط با کارایی خدمات، قابلیت اطمینان دستگاه و مدیریت بودجه و منابع شرکت‌ها است. این روش با اجرای طرح

^{۱۴} -Reliability Center Maintenance



شکل ۱۰: مقایسه دسترس پذیری ماشین فرز CNC در سالهای ۱۳۹۰-۱۳۹۷

همانطور که در شکل بالا ملاحظه می شود در سال ۱۳۹۲ دسترس پذیری دستگاه ۶۳/۸٪ شده است و حدود ۲۸٪ کاهش یافته است که دلیل آن خرابی محور و بستر کنگی و توقف کامل دستگاه و خط تولید بوده و مدت زمان تامین قطعات مورد نیاز از شرکت سازنده آن حدود ۷۰۴ ساعت کاری بوده است. بنابراین لازم است برنامه نگهداری پیشگیرانه برای محور و بستر به عنوان قطعه بحرانی و حساس در نظر گرفته شود و پیش بینی قطعه/قطعات یدکی مورد نیاز اندیشیده شود و برنامه RCM به طور کامل اجرایی شود؛ یکی دیگر از دلایل توقف خط تولید در سال ۱۳۹۲ نداشتن اهتمام و اعتقاد کافی به پیاده سازی RCM بوده که پس از اجرای این روش در سال ۱۳۹۳ نسبت به سال ۱۳۹۲ دسترس پذیری به میزان ۲۷/۴٪ افزایش یافته است و در سال های بعد این روند بهبود ادامه پیدا کرده است.

۶- شاخص های MTBF و MTTR

با توجه به بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان دستگاه فرز CNC شکل (۳) که دارای ساختار سری و از ارتباط المان های E1 تا E5 است، شاخص های MTBF و MTTR بر اساس معادلات (۳ تا ۵) به صورت زیر تخمین زده می شوند:

$$MTBF_{1391} = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 \lambda_i} = \frac{1}{0.0023 + 0.00091 + 0.000092} = 165.22H_r$$

که مقدار MTBF و MTTR دستگاه در سال های ۱۳۹۷-۱۳۹۰ در جدول (۶) آورده شده است:

همانطور که در جدول (۶) و در شکل های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می شود در سال ۱۳۹۲ کمترین میزان متوسط زمان

جدول ۴: نرخ خرابی و نرخ تعمیر ماشین فرز CNC در سال ۱۳۹۷-

سال	نرخ تعمیر	نرخ خرابی	حالت انجام وظیفه
۱۳۹۱	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۰۰۵۵	کلگی
۱۳۹۲	۰/۵	۰/۰۰۰۵۴	
۱۳۹۳	۰/۰۷۱۴۳	۰/۰۰۰۵	
۱۳۹۴	۰/۵	۰/۰۰۰۴۸۷	
۱۳۹۵	۰	۰	
۱۳۹۶	۰	۰	
۱۳۹۷	۰/۱۰۹۵۹	۰/۰۰۰۳۸	ختک کننده
۱۳۹۱	۰/۴	۰/۰۰۰۱۱	
۱۳۹۲	۰/۲۹۴۱۱	۰/۰۰۰۲۷۴	
۱۳۹۳	۰/۶۶۶۶۶	۰/۰۰۰۹۹	
۱۳۹۴	۰/۰۵۶۶	۰/۰۰۱۵۵	
۱۳۹۵	۰	۰	
۱۳۹۶	۰/۳۳۳۳۳	۰/۰۰۰۳۷۲	محورها و بستر
۱۳۹۷	۰/۲۱۴۳	۰/۰۰۰۱۱	
۱۳۹۱	۰	۰	
۱۳۹۲	۰/۰۲۰۳۴	۰/۰۰۰۸۳۳	
۱۳۹۳	۰/۱۲	۰/۰۰۱۵۴	
۱۳۹۴	۰/۰۱۶۷	۰/۰۰۰۵۲	
۱۳۹۵	۰/۲۸۵۷۱	۰/۰۰۰۸۷	سیستم هیدرولیک
۱۳۹۶	۰/۲۶۷	۰/۰۰۱۵۱	
۱۳۹۷	۰	۰	
۱۳۹۱	۰	۰	
۱۳۹۲	۰/۲۵	۰/۰۰۰۵۴	
۱۳۹۳	۰/۳۳۳۳	۰/۰۰۰۲	
۱۳۹۴	۰/۵	۰/۰۰۰۴۸	کنترل پنل
۱۳۹۵	۰	۰	
۱۳۹۶	۰/۳۳۳۳	۰/۰۰۱۵۲	
۱۳۹۷	۰/۵	۰/۰۰۰۳۷۸	
۱۳۹۱	۰	۰	
۱۳۹۲	۰/۰۴۳۴۷	۰/۰۰۰۵۵	
۱۳۹۳	۰/۱۱۱۱	۰/۰۰۱۵۲۵	
۱۳۹۴	۰/۳۳۳۳	۰/۰۰۰۴۸۶	
۱۳۹۵	۰/۸۵۷۱	۰/۰۰۱۳	
۱۳۹۶	۰/۳۳۳۳	۰/۰۰۰۷۴۸	
۱۳۹۷	۰/۵	۰/۰۰۰۷۵۹	

جدول ۵: دسترس پذیری ماشین فرز CNC از سال ۱۳۹۷-۱۳۹۰

سال	دسترس پذیری دستگاه (درصد)
۱۳۹۰	۹۶/۳
۱۳۹۱	۹۹/۶۹
۱۳۹۲	۶۸/۶۳
۱۳۹۳	۹۶/۰۴
۱۳۹۴	۹۴/۲۴
۱۳۹۵	۹۹/۵۴
۱۳۹۶	۹۸/۶۵
۱۳۹۷	۹۹/۲۸

۷- نتیجه‌گیری

- در این مقاله قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری و شاخص‌های MTBF و MTTR با استفاده از زنجیره مارکوف بررسی شده است.

- تقاضای مشتری برای تحویل به موقع محصول، کیفیت و عملکرد مناسب و قابلیت اطمینان بالا، استفاده از دستگاه‌های پیشرفته تولید را افزایش داده است. دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان بالای دستگاه‌ها، به تولید کننده در جهت رفع تعهدات مشتری اطمینان خاطر می‌دهد. همچنین تولیدکننده در در تولید پیوسته بوسیله این دستگاه‌ها از مزایای اقتصادی بهره‌مند می‌شود.

- با استفاده از تحلیل مارکوف، میزان دسترس‌ناپذیری زیر مجموعه‌های اصلی ماشین فرز به ترتیب برای کلگی ۰٪، خنک کننده ۵۳٪، محورها و بستر ۱۶۵٪، کنترل پنل ۳۱٪ و سیستم هیدرولیک ۱۱۶٪ در سال ۱۳۹۰ تخمین زده شد و میزان دسترس‌پذیری دستگاه فرز CNC با استفاده از روش مارکوف، ۹۶٪ تخمین زده شد.

- سیاست‌گذاری اجرای RCM و انجام اقدامات نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی شده در سالهای بعد با رویکرد بهبود قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری هدف گذاری گردید تا باعث بهبود دسترس‌پذیری دستگاه و خط تولید شود.

- در سال ۱۳۹۲، به دلیل خرابی کلگی دستگاه که یک قطعه‌ی بحرانی است هر چند روش RCM پیاده‌سازی شده بود، ولی به دلیل کافی نبودن آموزش پرسنل تعمیر و نگهداری و عدم اعتقاد کافی شرکت در پیاده‌سازی این روش، کاهش ۲۸٪ دسترس‌پذیری دستگاه در این سال رخ داد و در ادامه با پیاده‌سازی رویکرد RCM، روند بهبود دسترس‌پذیری از ۶۸/۶۳٪ به ۹۹/۲۸٪ مشاهده شد.

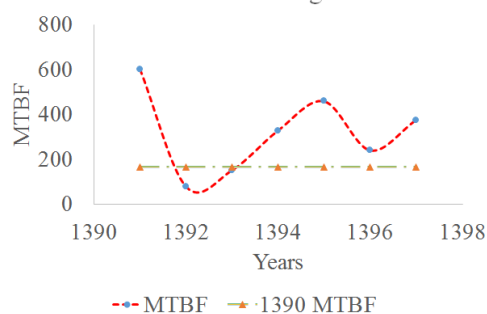
- در سال ۱۳۹۲، MTBF به میزان ۷۸/۶۲ ساعت بوده و روند کاهشی داشته است. در این سال MTTR دارای روند افزایشی برابر ۳۴/۶ ساعت بوده است. با پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)، در سال ۱۳۹۷، MTBF از ۷۸/۶۲ ساعت به ۳۷۵/۴۸ ساعت افزایش یافته است و MTTR از ۳۴/۶ ساعت به

بین خرابی‌ها، قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری دستگاه را به دلیل خرابی مجموعه‌ی کلگی دستگاه داشته و متوسط زمان تعمیر دستگاه نیز در این سال بالاترین مقدار است و نسبت به کمترین MTTR ثبت شده در این سال‌ها ۱۶/۵ برابر و نسبت به بیشترین MTTR ثبت شده حدود ۲ برابر بیشتر است. ضمناً در مقایسه‌ی دسترس‌پذیری سال ۱۳۹۴ نسبت به سال ۱۳۹۰ شاهد افزایش ۲/۱٪ MTTR مجموعه‌های اصلی دستگاه هستیم.

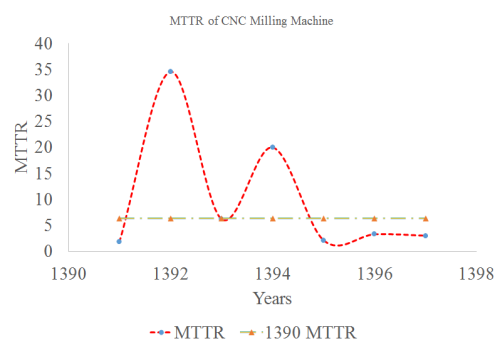
جدول ۶- مقدار MTBF و MTTR دستگاه در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۰

سال	MTBF(Hr)	MTTR(Hr)
۱۳۹۰	۱۶۵/۲۲	۶/۳
۱۳۹۱	۶۰۲/۶	۱/۸
۱۳۹۲	۷۸/۶۲	۳۴/۶
۱۳۹۳	۱۵۱/۸۶	۶/۲
۱۳۹۴	۳۲۸/۷۱	۲۰
۱۳۹۵	۴۵۹/۷۹	۲/۱
۱۳۹۶	۲۴۰/۶۴	۳/۳۷
۱۳۹۷	۳۷۵/۴۸	۳

MTBF of CNC Milling Machine



شکل ۱۱: MTBF ماشین فرز از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷



شکل ۱۲: MTTR ماشین فرز از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷

- vol. 49, pp. 67-72.
- [8] Zhao-Jun, Z., Y., Hai-Chen, C., Fei-Chen, Bo-Hao, Q., & Bin-Bin, X. (2013). Reliability analysis of machining center based on the field data, *Maintenance and Reliability*, Vol.15, pp.147-155.
- [9] Ying-Zhi, Z., Rui Z., Gui-Xiang, S., Bing-Kun, C., and shan, Z. (2011). Reliability analysis for CNC machine tool turret including abnormal data, *IEEE*, Vol. 11, pp. 1136-1139.
- [10] Lad, B.K., & Kulkarni, M.S. (2010). A parameter estimation method for machine tool reliability analysis using expert judgment, *International journal of data analysis techniques and strategies*, Vol.2, No.2, pp.155-169.
- [11] IEC 61165: 2006; Application of Markov Techniques, TC56-Dependability.
- [12] Purba, J. H., Lu, J., Zhang, G., Pedrycz, W. (2014). Fuzzy Reliability assessment of basic events of fault trees through qualitative data processing, *Fuzzy Sets syst.* 24350-69
- [13] Lo, H.W., Huang, C.N. Chuang, Y.C. (2018). A novel failure mode and effect analysis model for Machine tool risk analysis, *Reliability Engineering and System Safety*.
- [14] Fazlollahtabar, H., & Akhavan Niaki, S.T. (2018). Fault tree analysis for reliability evaluation of an advanced complex manufacturing system, *Journal of advanced Manufacturing systems*, Vol.17 No.1107-18.
- [15] Bhimgonda Patil, R., Kothavale, B., Yadu Waghmode, L., Joshi, S. (2017). Reliability analysis of cnc turning center based on the assessment of trends in maintenance data- a case study, *International Journal of Quality&Reliability Management*.
- [16] ohring, M., Kasprzak, L. (2006). *Reliability and Failure of ELECTRONIC MATERIALS AND DEVICES*", Second Edition, ISBN 978-0-12-088574-9, Academic Press is an imprint of Elsevier.
- ۳ ساعت در سال ۱۳۹۷ کاهش یافته است که باعث بهبود دسترس پذیری دستگاه شده است.
- با توجه به کافی نبودن داده های خرابی در دسترس و نبود بانک اطلاعاتی خرابی پیشنهاد می شود که از منطق فازی در تخمین قابلیت اطمینان و دسترس پذیری دستگاه فرز CNC استفاده شود همچنین در تحقیقی دیگر تخمین قابلیت اطمینان دستگاه با استفاده از زنجیره مارکوف فازی بررسی و مقایسه ای با روش ارائه شده صورت گیرد.

۸- منابع

- [1] Birolini, A. (2017). *Reliability Engineering Theory and Practice*, 8th ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [2] Kumar Agrawal, A., Chattopadhyaya, S. (2019). Investigation in to reliability, Maintainability ana availability of tunnel boring machine operating in mixed ground condition using markov chain, *enginerring failure analysis*, Vol. 105, pp.477-489.
- [3] Kalaiarasi, A., Anita. M, Geethanjali. R. (2017). Analysis of system reliability using markov technique, *Global journal of pure and applied mathematics*, Vol.13, pp.5265-5273.
- [4] Yang, Z., Zhu, D., Chen, C. (2018). Reliability modeling of CNC machine tools based on the improved maximum likelihood estimation method, *journal of mathematical problems in engineering*. <https://doi.org/10.1155/2018/4260508>.
- [5] Washimkar, P. V., Deshpande, V. S., Modak, J. P., Nasery, A. V. (2011). Formulation of Preventive Maintenance Schedule for Dragline System, *IACSIT*, Vol.3, No.4.
- [6] ling Li, L., Tseng, M. L., Sun, J. (2018). Reliability measure model for electromechanical products under multiple types of uncertainties, *Appl. Soft Comput.* J. 65, 69-78.
- [7] Xu, Y., Xi, Y., Li, D., Zhou, Z. (2016). Traffic Signal Control Based on Markov Decision Process, *IFAC-Papers On Line*,

Estimating the availability of CNC milling machine using Markov chain

Hojjat allah Aadami¹, Abbas Rad^{*2} and Akbar Alam Tabriz² Hossain Goodarzi³

1- PhD student in logistics, Faculty of Management and strategy, Comprehensive Imam Hussein (AS) University, Tehran, Iran

2- Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Evin, Daneshju Blvd, Shahid Shahriari, Tehran, Iran

3- Master of Mechanics, Qazvin Labor University

1- Purpose and background

Precision machining of complex industrial parts requires special machines, one of the best of which is the CNC milling machine. These machines have flexibility, constant accuracy and high production efficiency. Failure of machines can cause the production line to stop, while repairs to these machines can be time consuming and costly when they fail without prior possibility, and the provision of spare parts is costly due to the need to import them. Therefore, it is necessary to calculate the availability and reliability of the device from the collected failure data and to develop and implement a proper maintenance and repair plan. In order to develop an effective maintenance plan, it is necessary to use the collected failure data to predict reliability and availability with appropriate accuracy in the future so that we can build on this based. The main subsystems of CNC milling machine include; The Hydraulic System, Cooling, Spindle, Bed & Axis, and Panel Control (Figure 1).

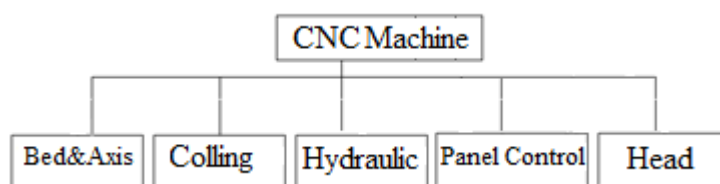


Figure 1: The main subsystems of CNC milling machine

Various methods have been used in research to determine reliability, maintenance and availability. Some of these methods include: event tree, error tree analysis, reliability-center maintenance (RCM), fuzzy reliability measurement, and Markov

Corresponding author: HojatAdami@Gmail.Com

modeling. Continuously renewable or repairable systems are simulated using random processes such as Markov and Semi-Markov. Markov's analysis is based on mathematical modeling, the failure states of which depend only on the current state of the sample. In this analysis, a transfer matrix is formed that connects the current state and the next state, the future, with a fixed failure / repair rate. Most electronic components fail at a fixed failure rate; Therefore, they can be modeled using the Markov chain. Anil Kumar Agraval et al (2019). Used the Markov model to analyze the reliability of the road tunnel drilling rig (EPBTBM). They have increased it by 70%, and they have done so through preventive maintenance. In this study, the analysis data were collected in a short period of time, but a comparison between MTBF and MTTR indices was not investigated. It has not been studied. Zhao-Jun et al (2013). Reviewed the optimization of maintenance policies to improve the reliability of the machining Process. The components of the preventive maintenance program have been proposed periodically and consecutively (daily, etc.). In this article, no study has been done on the availability of the device and MTBF and MTTR indicators. Rajkumar Bhimgonda et al (2017) used data from time to failure and time to delay to estimate the maintenance and repair parameters of the CNC lathe, and with proper maintenance and repair planning, the reliability of the CNC machine has increased by about 45%, and the initial costs The improvement of 0.25% has an increasing trend, but instead the total cost over the life cycle has decreased by 25%. In this paper, we seek to fill the research gap in improving the reliability and availability of the CNC milling machine by implementing a reliability-center maintenance method with machine failure data for a period of seven years and index analysis of MTBF, MTTR and availability using Markov chain.

2- Research method

In this article, the failure of the device is extracted annually from the failures recorded in the repair and control sheets of the device, which have been prepared by the maintenance and repair personnel. Then, using Markov chain, four-axis CNC milling machine was used in 2011 to estimate the reliability, maintainability and availability. Then, this information was considered as a basis for implementing the reliability-center maintenance method (RCM) and calculating the availability for the years 2012-2018.

2-1- Markov transition diagram and modeling

The transition- diagram for the milling machine is shown in Figure (2) and the task mode with 0 and the fail mode with ($i = 1,2,3,4,5$) are shown.

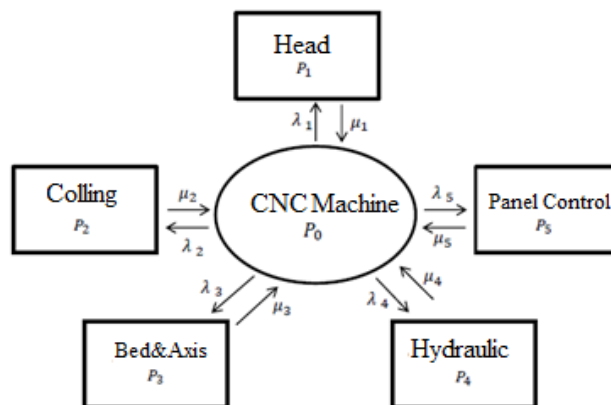


Figure 2: Machine transition state diagram and its main subsets

At the beginning of turning on the machine ($t = 0$), the machine is in working condition and the subsystems reach a non-functional state or unavailable state and vice versa. Transition mode represents only two modes of availability and unavailability, and vice versa.

3- Findings

The milling machine and its components, in a series of configurations, form a system that interacts with each other. Because the useful life of CNC milling machine is considered and on the other hand, researchers have proposed an exponential distribution for the useful life period, this distribution has also been used to calculate reliability. Figures (3) and (4) show the reliability and maintainability of the subsets. Because the main components of the milling machine are connected in series, the reliability

of the milling machine decreases with time. This value is plotted in the diagrams for the one-year operating time (2212 hours).

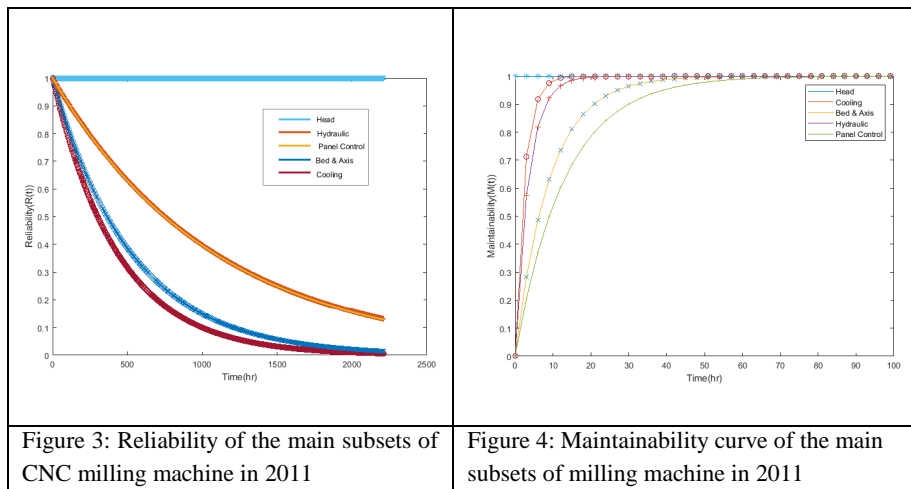


Figure 4: Maintainability curve of the main subsets of milling machine in 2011

According to Markov equation, the unavailability of the head assembly, cooling, axis and bed, control panel and hydraulic in 2011 are 0%, 0.53%, 1.65%, 0.31% and 1.16%, respectively and availability is 96.34% (Figure 5).

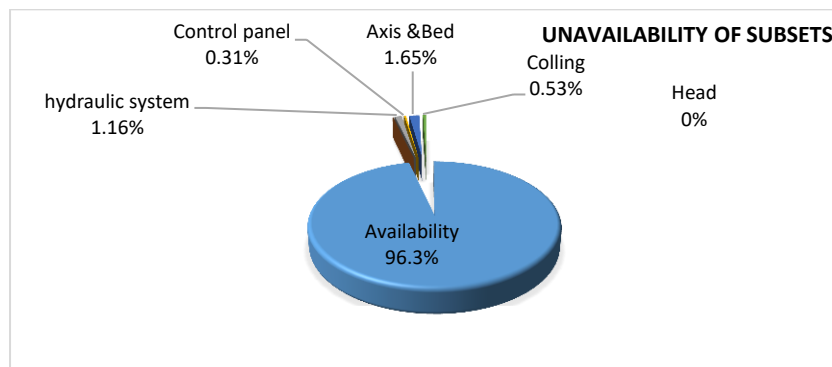


Figure 5: Availability and unavailability of CNC milling machine and its subsets in 2011

4- Reliability center maintenance (RCM)

Ensures the reliability, reliability and mission of the device during production by implementing a maintenance plan. This tool provides optimal maintenance services and time intervals and makes the device and critical parts accessible. As can be seen in the figure above, in 2013, the availability of the device has become 63.8% and has decreased by about 28% due to head failure and complete stop of the device and production line, and the time required to supply the required parts from the manufacturer. It has been about 704 working hours (Figure 6). Therefore, it is necessary to consider the preventive maintenance program for the head as a critical and sensitive part, and the forecast of the required part/spare parts should be

considered and the RCM program should be fully implemented. Another reason for stopping the production line in 2013 was the lack of sufficient attention and belief in the implementation of RCM, which after the implementation of this method in 2014 compared to 2013, the availability has increased by 27.4% and in subsequent years This process of improvement has continued. As can be seen in Figures (7) and (8) in 2013, the lowest average time between failures, the reliability and availability of the device due to the failure of the whole set of the device and the average repair time of the device in This year is the highest and is 16.5 times higher than the lowest MTTR recorded in these years and about 2 times higher than the highest MTTR recorded.

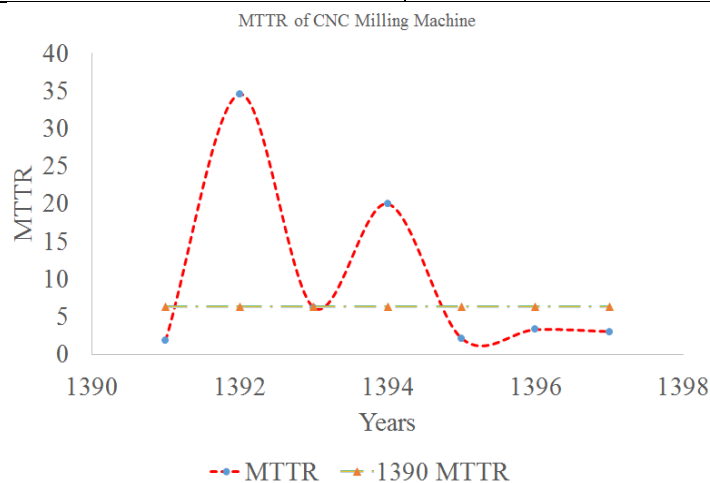
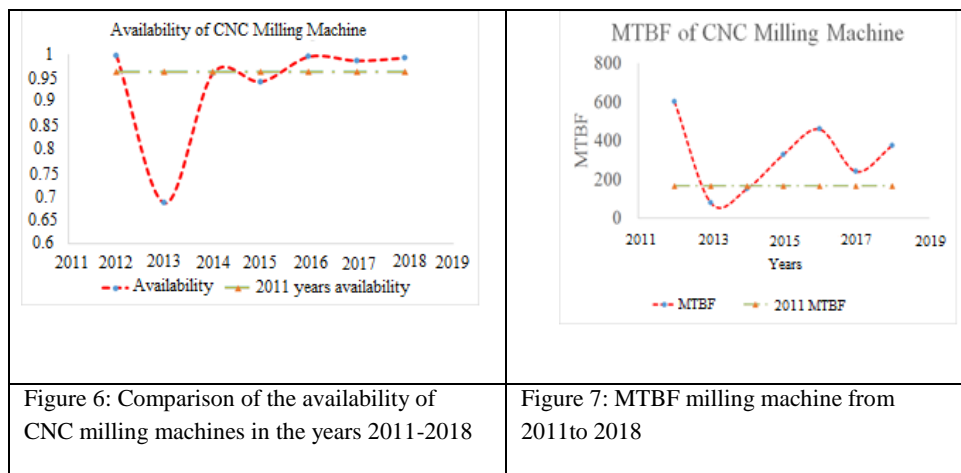


Figure 8: MTTR milling machine from 2011 to 2018

5- Conclusion

- In this paper, the reliability, availability and MTBF and MTTR indices are examined using the Markov chain.

- Customer demand for timely product delivery, good quality and performance and high reliability, has increased the use of advanced production equipment. The high availability and reliability of the devices, assures the manufacturer to meet customer obligations. The manufacturer also enjoys economic benefits in the continuous production by these devices.
- Using Markov analysis, the unavailability of the main subsets of the milling machine for 0% for head, 0.53% for cooling, 1.65% for axles and bed, 0.31% for control panel and 16.16 for hydraulic system, respectively. 1% was estimated in 2011 and the availability of CNC milling machine using Markov method was estimated to be 96.3%.
- The policy of implementing RCM and performing planned maintenance actions in the following years was targeted with the approach of improving reliability and accessibility in order to improve the accessibility of the device and the production line.
- In 2013, although the RCM method was implemented, but due to the head failure of the device, which was a critical part of the set, the production line was stopped, which due to insufficient training of maintenance personnel and insufficient belief in participating in the implementation of this method, there was a 28% decrease in device availability compared to 2011. Then, by implementing the RCM approach, the trend of improving availability was observed from 68.63% to 99.28%.
- In 2013, MTBF was 78.62 hours and had a decreasing trend. This year, MTTR has had an increasing trend of 34.6 hours. With the implementation of reliability-based maintenance and repairs (RCM), in 2018, MTBF increased from 78.62 hours to 375.48 hours and MTTR decreased from 34.6 hours to 3 hours in 2018, which caused Improved device availability.

6- Reference

- [17] Birolini, A. (2017). Reliability Engineering Theory and Practice, 8th ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [18] Kumar Agrawal, A., Chattopadhyaya, S. (2019). Investigation in to reliability, Maintainability ana availability of tunnel boring machine operating in mixed ground condition using markov chain, engineering failure analysis, Vol. 105. pp.477-489.
- [19] Kalaierasi, A., Anita. M, Geethanjali. R. (2017). Analysis of system reliability using markov technique, Global journal of pure and applied mathematics, Vol.13, pp.5265-5273.
- [20] Yang, Z., Zhu, D., Chen, C. (2018). Reliability modeling of CNC machine tools based on the improved maximum likelihood estimation method, journal of mathematical problems in engineering. <https://doi.org/10.1155/2018/4260508>.
- [21] Washimkar, P. V., Deshpande, V. S., Modak, J. P., Nasery, A. V. (2011). Formulation of Preventive Maintenance Schedule for Dragline System, IACSIT, Vol.3, No.4.
- [22] ling Li, L., Tseng, M. L., Sun, J. (2018). Reliability measure model for

- electromechanical products under multiple types of uncertainties, *Appl. Soft Comput. J.* 65, 69–78.
- [23] Xu, Y., Xi, Y., Li, D., Zhou, Z. (2016). Traffic Signal Control Based on Markov Decision Process, *IFAC-Papers On Line*, vol. 49, pp. 67–72.
- [24] Zhao-Jun,Z. Y.,Hai-Chen, C., Fei-Chen, Bo-Hao,Q., & Bin-Bin, X. (2013). Reliability analysis of machining center based on the field data, *Maintenance and Reliability*, Vol.15, pp.147-155.
- [25] Ying-Zhi, Z., Rui Z., Gui-Xiang, S., Bing-Kun, C., and shan, Z. (2011). Reliability analysis for CNC machine tool turret including abnormal data, *IEEE*, Vol. 11, pp. 1136-1139.
- [26] Lad, B.K., & Kulkarni, M.S. (2010). A parameter estimation method for machine tool reliability analysis using expert judgment, *International journal of data analysis techniques and strategies*, Vol.2, No.2, pp.155-169.
- [27] IEC 61165: 2006; Application of Markov Techniques, TC56-Dependability.
- [28] Purba, J. H., Lu, J., Zhang, G., Pedrycz, W. (2014). Fuzzy Reliability assessment of basic events of fault trees through qualitative data processing, *Fuzzy Sets syst.*24350-69
- [29] Lo, H.W., Huang, C.N. Chuang, Y.C. (2018). A novel failure mode and effect analysis model for Machine tool risk analysis, *Reliability Engineering and System Safety*.
- [30] Fazlollahtabar, H., & Akhavan Niaki, S.T. (2018). Fault tree analysis for reliability evaluation of an advanced complex manufacturing system, *Journal of advanced Manufacturing systems*, Vol.17 No.1107-18.
- [31] Bhimgonda Patil, R., Kothavale, B., Yadu Waghmode, L., Joshi, S. (2017). Reliability analysis of cnc turning center based on the assessment of trends in maintenance data- a case study, *International Journal of Quality&Reliability Management*.
- [32] ohring, M., Kasprzak, L. (2006). *Reliability and Failure of ELECTRONIC MATERIALS AND DEVICES*", Second Edition, ISBN 978-0-12-088574-9, Academic Press is an imprint of Elsevier.

