

محاسبه قابلیت دسترسی ماشین‌آلات سیستم بارگیری در معادن روباز براساس مدل زنجیره مارکوف

سید حامد دلقندی^۱، احمد رضا صیادی^{۲*}، وحید برادران^۳، سید هادی حسینی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۲- دانشیار اقتصاد معدن، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.
- ۴- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۵/۵/۱۶

دریافت: ۱۳۹۴/۹/۴

چکیده

قابلیت دسترسی یا دسترس پذیری از مهم‌ترین ویژگی‌های تبیین کیفیت عملکرد سیستم ماشین‌آلات تعمیرپذیر و بهبود مدیریت و برنامه‌ریزی تولید محسوب می‌شود. عملیات بارگیری بخش مهمی از چرخه تولید در معادن را تشکیل می‌دهد و در این مقاله، رویکردی برای بررسی قابلیت دسترسی ماشین‌آلات سیستم بارگیری در معادن روباز بر مبنای تئوری زنجیره مارکوف ارائه شده است. روش مارکوف مبتنی بر حالت‌های مختلف سیستم و نحوه گذر از حالتی به حالت دیگر است. از این روش تحلیل داده‌ها و تعیین نرخ‌های خرابی و تعمیر از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. برای نشان‌دادن چگونگی عملکرد مدل از داده‌های معدن سنگ آهن میشدوان استفاده شده است. به این منظور ضمن محاسبه شاخص‌های نرخ خرابی و تعمیر ماشین‌ها، قابلیت دسترسی آنها تعیین شده است. برای صحت‌سنجی، تحلیل داده‌ها و افزایش دقت تشخیص رفتار خرابی و تعمیر سیستم از آزمون‌های آماری مرتبط استفاده شده است. براساس نتایج اخذ شده، نرخ خرابی و تعمیر برای بیل مکانیکی نیوهلند



به ترتیب ۰/۰۱۹ و ۰/۰۶۴ و برای بیل مکانیکی کوماتسو ۰/۰۱۷ و ۰/۰۴۷ است. همچنین قابلیت دسترسی سیستم بارگیری معدن در بخش ماشین‌آلات بیل مکانیکی، ۹۳/۹ درصد برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: قابلیت دسترسی، زنجیره مارکوف، سیستم بارگیری، بیل مکانیکی.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم‌های تعمیرپذیر، قابلیت دسترسی^۱ یا دسترس‌پذیری می‌باشد که مفهوم آن احتمال یافتن سیستم در شرایط لازم برای عملکرد در آینده است [۱]. قابلیت دسترسی بیانگر کیفیت عملکرد ماشین‌آلات و سیستم بوده و محاسبه آن برنامه‌های عملیاتی ماشین در فرایند تولید را دقیق‌تر و واقعی‌تر می‌کند. این امر به مدیران کمک خواهد کرد تا مقدار کارکرد ماشین در فرایند تولید را با حداقل خطای ممکن، برآورد کرده و فعالیت‌های سایر ماشین‌آلات را - که وابسته به میزان دسترس‌پذیری ماشین مورد نظر است - به درستی برنامه‌ریزی کنند. پیامد برنامه‌ریزی دقیق‌تر در فرایندهای تولید برآوردن به موقع تقاضا و استفاده بهینه از امکانات می‌باشد. روش‌های متعددی برای ارزیابی دسترس‌پذیری سیستم وجود دارد. دسترس‌پذیری سیستم برحسب ترکیب منطقی احتمال وقوع رخداد‌های تصادفی در سیستم ارزیابی می‌شود و این مبنا در همه روش‌های مختلف ارزیابی مشترک است.

مدلسازی قابلیت دسترسی سیستم به‌طور عمده به دو روش تحلیل مستقیم (مدلسازی شبکه‌ای) و مدلسازی مارکوف انجام می‌شود. در روش تحلیل مستقیم، قابلیت دسترسی هر یک از اجزا به صورت جداگانه محاسبه شده و با توجه به ترکیب قرارگرفتن اجزا، قابلیت دسترسی کل سیستم محاسبه می‌شود، برای مثال در سیستم‌های با اجزای متوالی، قابلیت دسترسی سیستم از ضرب قابلیت دسترسی هر یک از اجزای آن به دست می‌آید. این روش برای مدلسازی و ارزیابی قابلیت دسترسی سیستم‌های با ساختار ساده، مناسب است. برای تحلیل سیستم‌های پیچیده‌تر به‌ویژه در سیستم‌های تعمیرپذیر که مدت زمان تعمیر کوتاه و قابل اغماض نیست، از روش مارکوف استفاده می‌شود [۲]. این روش برای مدلسازی رفتار اتفاقی سیستم‌هایی که به‌طور

1. Availability



پیوسته و یا گسسته نسبت به زمان و یا در فضای حالت در تغییرند، قابل استفاده است. در فرایند مارکوف، احتمال قرارگرفتن در هر یک از حالت‌ها و گذر از هر حالت به حالت دیگر در سیستم مورد مطالعه مشخص می‌شود و بر مبنای آنکه در حالت حدی احتمال حالت‌ها تغییر نمی‌کند، مقادیر نهایی احتمال قرارگرفتن در حالت‌های مختلف محاسبه می‌گردد.

برخی مطالعات انجام شده در زمینه کاربرد روش مارکوف برای تعیین شاخص‌های قابلیت دسترسی از جمله قابلیت اطمینان، نرخ خرابی و نرخ تعمیر سیستم‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ برخی تحقیقات صورت گرفته در تعیین شاخص‌های قابلیت دسترسی به روش مارکوف

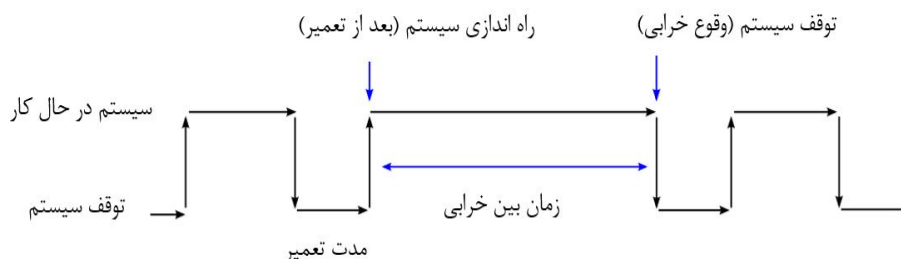
سال	مؤلف	زمینه تحقیق
۱۹۷۰	Buzacott [۳]	استفاده از روش مارکوف برای محاسبه زمان‌های خرابی سیستم‌های تعمیرپذیر
۱۹۸۰	Bobbio et al. [۴]	استفاده از مدل مارکوف همگن چندحالتی در محاسبه قابلیت اطمینان
۱۹۸۸	Kitchin [۵]	آنالیز قابلیت اطمینان از طریق مدل کاربردی مارکوف
۱۹۹۱	Topuz & Duan [۶]	مدلسازی قابلیت دسترسی معدن‌کاری پیوسته از طریق مدل مارکوف
۱۹۹۷	Ouhbi & Limnios [۷]	محاسبه قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری با استفاده از روش مارکوف در توریو زئراتورها
۱۹۹۸	Li et al. [۸]	محاسبه قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری سیستم تعمیرپذیر سه جزئی در میکروالکترونیک
۲۰۰۰	Whittaker et al. [۹]	آنالیز قابلیت اطمینان بر پایه زنجیره مارکوف در توسعه نرم‌افزارها
۲۰۰۴	Wang & Pham [۱۰]	آنالیز قابلیت اطمینان مبتنی بر زنجیره مارکوف برای سیستم‌های توزیع برق
۲۰۰۹	Kumar & Jackson [۱۱]	مدلسازی قابلیت اطمینان برای نرخ‌های خرابی غیرثابت با استفاده از آنالیز مارکوف
۲۰۰۹	Pang et al. [۱۲]	تحلیل قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری دو سیستم موازی قابل تعمیر از طریق مدل مارکوف
۲۰۱۱	Liu et al. [۱۳]	محاسبه قابلیت دسترسی سیستم دارای دو جزء تعمیرپذیر
۲۰۱۳	Jackson [۱۴]	مدلسازی قابلیت اطمینان با ترکیب آنالیز مارکوف و تابع توزیع وینال
۲۰۱۴	Malefaki et al. [۱۵]	محاسبه قابلیت اطمینان سیستم تعمیرپذیر با استفاده از مارکوف چندگانه
۲۰۱۵	Timashev & Bushinskaya [۱۶]	ارزیابی قابلیت اطمینان و تشخیص دوره مناسب تعمیر خط لوله با استفاده از روش مارکوف



بیشتر این مطالعات درخصوص استفاده از روش مارکوف در تحلیل قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری سیستم‌های ثابت بوده و در رابطه با ماشین‌آلات متحرک به‌ویژه ماشین‌آلات معدنی، کمتر مطالعه جدی صورت گرفته است. عملیات بارگیری بخش مهمی از چرخه تولید در معادن روباز بوده و بیل‌های مکانیکی یکی از انواع بارگیرهای بسیار رایج هستند. در این مقاله، رویکردی برای بررسی قابلیت دسترسی ماشین‌آلات سیستم بارگیری در معادن روباز بر مبنای تئوری زنجیره مارکوف ارائه شده است.

۲- تعاریف و مفاهیم

در ادامه برخی از تعاریف و مفاهیم مورد استفاده در این مقاله تعریف می‌شوند.
زمان بین خرابی‌ها (TBF): فاصله زمانی بین خرابی‌های متوالی یک بخش یا قطعه قابل تعمیر (تعمیرپذیر) از دستگاه [۱۷]. این زمان در واقع حد فاصل بین راه‌اندازی سیستم بعد از هر تعمیر تا وقوع توقف سیستم به علت خرابی می‌باشد که در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱ مدل شماتیک عملکرد یک سیستم تعمیر پذیر [۱۷]

زمان تعمیرات (TTR): زمان موردنیاز برای رفع نقص یا تعمیر بخش خراب‌شده دستگاه [۱۸].

1. Time Between Failures
2. Time to repair



قابلیت دسترسی (دسترس پذیری): احتمال عملکرد مطلوب سیستم در شرایط معین و در یک بازه از زمان [۱۸].

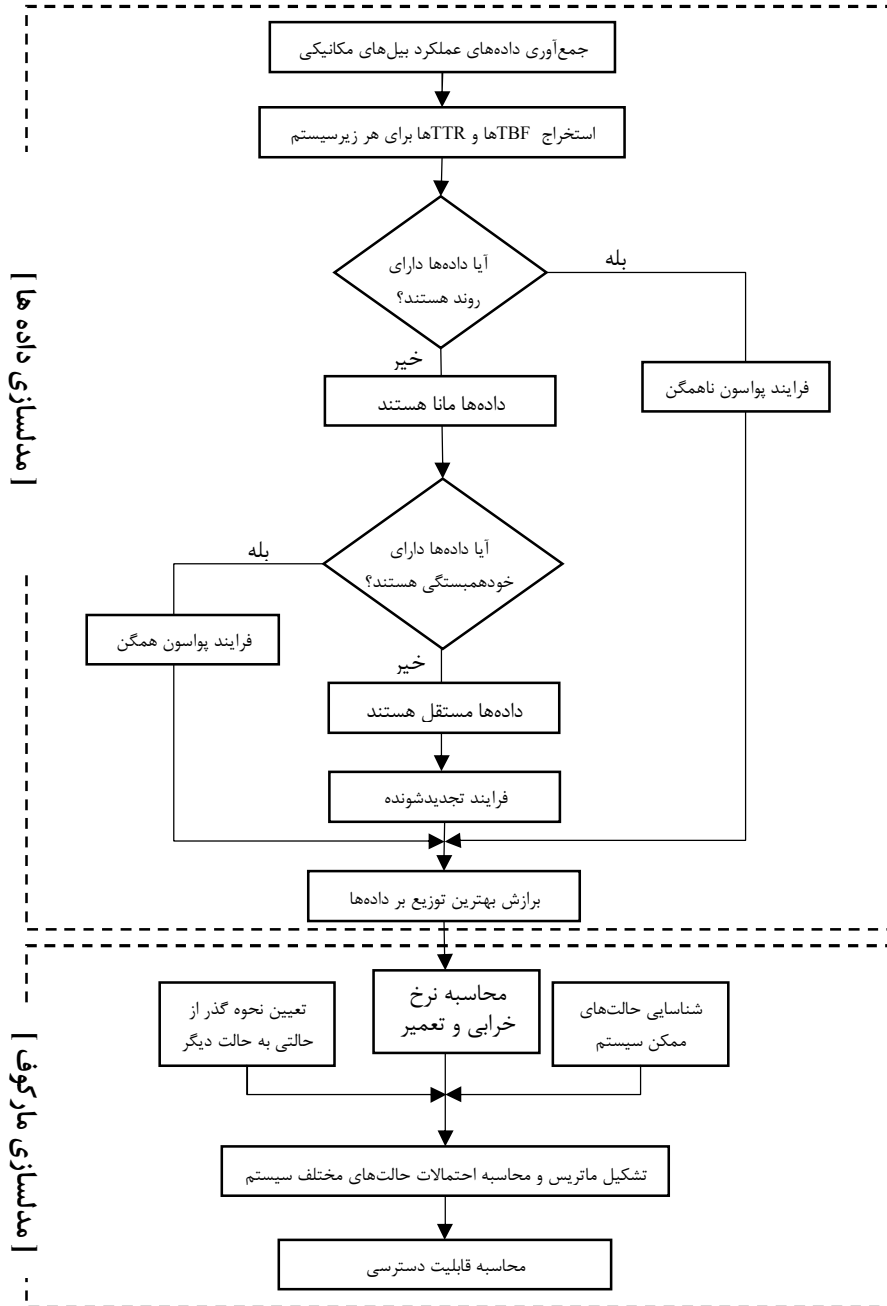
نرخ خرابی^۱: تعداد از کارافتادگی‌های سیستم در محدوده زمانی که سیستم در حال کار بوده است [۲].

نرخ تعمیر^۲: تعداد تعمیرات با بازیافت صحت سیستم در محدوده زمانی که سیستم تحت تعمیر قرار داشته است [۲].

۳- روش تحقیق

مدلسازی قابلیت دسترسی با استفاده از مدل مارکوف شامل سه مرحله اساسی شناسایی حالت‌های (وضعیت‌های) ممکن سیستم، تعیین نحوه گذر از حالتی به حالت دیگر و مشخص کردن ماتریس حالت تصادفی است. از این رو لازم است حالت‌های مختلف هر یک از اجزای تشکیل دهنده سیستم و نحوه ارتباط آنها با یکدیگر، مورد بررسی قرار گرفته و نحوه تغییر حالت‌های سیستم و نرخ گذر از حالتی به حالت دیگر تعیین شود. به این ترتیب تعیین نرخ خرابی و تعمیر به عنوان اصلی‌ترین بخش مدلسازی دسترس پذیری به روش مارکوف مطرح است. در این راستا، در این مقاله، فرایند مدلسازی قابلیت دسترسی در دو بخش مدلسازی داده‌های خرابی و تعمیر و مدلسازی مارکوف ارائه شده است (شکل ۲).

1. Failure rate
2. Repair rate



شکل ۲ فرایند مدلسازی قابلیت دسترسی



۳-۱- مدل‌سازی داده‌های خرابی و تعمیر

یافتن بهترین تابع توزیع چگالی احتمال سازگار با داده‌ها، اولین گام در محاسبات نرخ خرابی و تعمیر به شمار می‌آید. به همین منظور، زمان بین خرابی‌ها (TBF) و زمان تعمیر (TTR) به عنوان متغیرهای تصادفی تشکیل دهنده جامعه آماری مورداستفاده در مدل‌سازی می‌باشند. برای تعیین بهترین توزیع برازش شده بر داده‌ها و تعیین تابع توزیع چگالی به روش آمار کلاسیک، لازم است داده‌ها از نظر آماری مستقل و مانا (iid)^۱ باشند [۱۹،۲۰]. در شرایطی که روند و همبستگی وجود نداشته باشد، داده‌ها از نظر آماری مستقل و مانا نامیده می‌شوند [۲۱]. لازم به ذکر است که منظور از همبستگی، همبستگی رتبه یک می‌باشد؛ یعنی همبستگی هر داده با یک داده ماقبل آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴- آزمون روند

به الگوی خرابی‌های یک دستگاه روند گفته می‌شود که می‌تواند یکنواخت یا غیریکنواخت باشد. برای کنترل وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها، آزمون‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند که به طور کلی به دو گروه آزمون‌های تحلیلی و گرافیکی تقسیم می‌شوند. از جمله روش‌های تحلیلی، آزمون هندبوک نظامی^۲ است که از کاربرد بیشتری نسبت به سایر آزمون‌ها برخوردار است [۲۲]. در آزمون نظامی، ارزیابی وجود روند در داده‌ها با استفاده از محاسبه یک شاخص آماری انجام می‌شود که به صورت رابطه (۱) است [۲۳].

$$U = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \ln(T_n / T_i) \quad (1)$$

n : تعداد خرابی، T_n : زمان آخرین خرابی و T_i : زمان خرابی i ام است.

در این روش، فرض صفر این است که داده‌ها عاری از روند هستند. بر مبنای این فرض، شاخص U دارای توزیع کای-دو^۳ با $2(n-1)$ درجه آزادی است. برای کنترل صحت فرض

1. Independent and identically distributed
2. Military handbook test
3. Chi-square



صفر، پس از محاسبه U برای داده‌ها، از جدول توزیع کای - دو استفاده می‌شود. اگر U از عدد بحرانی قرائت شده از جدول استاندارد [۲] بزرگ‌تر باشد، فرض پایه صفر پذیرفته می‌شود. در صورتی که فرض موجود در سطح اعتماد بالای ۹۰ درصد (معمولاً ۹۵ درصد) پذیرفته شود، آنگاه مشخص می‌شود که داده‌ها روند ندارند. در صورت رد این فرض، داده‌ها دارای روند تشخیص داده می‌شوند.

۵- آزمون همبستگی مرتبه یک

هدف از این آزمون، ارزیابی استقلال یا همبستگی داده‌ها است. برای بررسی همبستگی داده‌های خرابی یک دستگاه از روش گرافیکی استفاده می‌شود. در این روش n امین داده خرابی به صورت تابعی از $(n-1)$ امین داده خرابی رسم می‌شوند. اگر نقاط موجود دارای نظم و ترتیب خاصی نباشد، نشان‌دهنده آن است که داده‌های متوالی دارای همبستگی نیستند. در غیر این صورت داده‌ها غیرمستقل خوانده می‌شوند [۱].

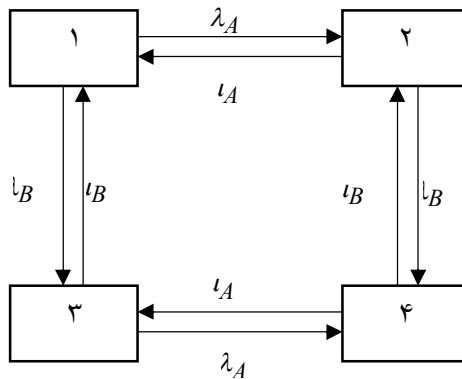
۵-۱- مدل‌سازی قابلیت دسترسی به روش مارکوف

برای استفاده از روش مارکوف، رفتار سیستم باید نمایانگر فقدان حافظه^۱ باشد؛ یعنی رفتار اتفاقی سیستم صرفاً به وضعیت حال بستگی داشته و هیچ‌گونه وابستگی به گذشته نداشته باشد [۲۴]. این فرض با توجه به اینکه تعمیرات صورت گرفته بر روی ماشین‌ها کاملاً استاندارد و بدون هیچ نقصانی بوده و خرابی‌های گذشته سیستم بر روی رفتار آینده آن، اثر ندارد، تحقق پیدا می‌کند. در روش مارکوف لازم است با شناخت و تحلیل مناسب از عملکرد سیستم، نخست تمام حالت‌های ممکن برای سیستم شناسایی شده و روند جابه‌جایی بین حالت‌ها تعیین شود. در این تحقیق مدل مارکوف برای دو زیرسیستم تعمیرپذیر A و B که از یک سیستم بوده و عملکرد مستقل دارند، در نظر گرفته شده است. بر همین مبنی حالت‌های ممکن مجموعه سیستم به صورت شکل ۳ قابل ارائه است که در آن μ و λ نمایانگر نرخ خرابی و نرخ تعمیر می‌باشند. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، چهار حالت ممکن برای مجموعه سیستم

1. Lack of memory



وجود دارد که با توجه به موازی بودن ارتباط اجزای تشکیل دهنده آن، وضعیت کل سیستم برای حالت‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳ نمودار فضای حالت‌های سیستم بارگیری

جدول ۲ وضعیت هر یک از اجزا و کل سیستم برای حالت‌های مختلف

وضعیت کل سیستم بارگیری	وضعیت هر ماشین		حالت
	ماشین B	ماشین A	
فعال	فعال	فعال	۱
فعال	فعال	خراب	۲
فعال	خراب	فعال	۳
غیرفعال	خراب	خراب	۴

با توجه به موازی بودن ارتباط اجزا و همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، سیستم در حالت‌های ۱، ۲ و ۳ فعال و تنها در حالت ۴ غیرفعال است، بنابراین قابلیت دسترسی سیستم بارگیری به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود که در آن A قابلیت دسترسی سیستم و P_z معرف احتمال قرارگرفتن سیستم در حالت z است.

$$A = P_1 + P_2 + P_3 \quad (2)$$



برای محاسبه احتمال حالت‌های مختلف، باید ماتریس احتمالات تغییر حالت تصادفی سیستم را تشکیل داد و با توجه به فضای حالات ممکن، این ماتریس به صورت رابطه (۳) ارائه می‌شود. در شرایط حدی میزان احتمال قرارگرفتن و گذر از حالت‌های سیستم تغییر نمی‌کند. در این صورت چنانچه α نمایانگر بردار احتمالات حدی و P ماتریس احتمالات تغییر حالت تصادفی باشد، خواهیم داشت:

$$\alpha P = \alpha \quad (۴)$$

که در آن بردار احتمالات حدی حالت‌ها (α) برابر ماتریس نشان داده شده در رابطه (۳) است.

$$\begin{bmatrix} 1 - (\lambda_A + \lambda_B) & \lambda_A & \lambda_B & 0 \\ \mu_A & 1 - (\lambda_B + \mu_A) & 0 & \lambda_B \\ \mu_B & 0 & 1 - (\lambda_A + \mu_B) & \lambda_A \\ 0 & \mu_B & \mu_A & 1 - (\mu_A + \mu_B) \end{bmatrix} \quad (۳)$$

۶- مطالعه موردی

در این تحقیق، سیستم بارگیری معدن سنگ آهن میشدوان مورد مطالعه قرار گرفته است. این معدن در استان یزد در ۳۵ کیلومتری شمال شهرستان بافق و در ۱۷ کیلومتری شمال معدن چغارت واقع شده است. ذخیره قابل استخراج معدن ۸/۵ میلیون تن با عیار ۳۸ درصد قابل استفاده در تولید کنسانتره و ۳/۳ میلیون تن با عیار ۵۹ درصد قابل استفاده در تولید محصول دانه‌بندی شده است. روش استخراج به صورت روباز پلکانی^۱ بوده و پس از بهینه‌سازی حد استخراج و طراحی کاواک نهایی^۲، ۸/۵۶ میلیون تن از این ذخیره با نسبت باطله‌برداری ۲/۹ قابل استخراج است. همچنین باطله‌برداری از کاواک به میزان ۲۴/۶۱ میلیون تن پیش‌بینی شده

1. Open pit
2. Final pit



است. بهره‌برداری از این معدن با هدف استخراج سنگ آهن برای تولید ۷۰۰ هزار تن سنگ آهن دانه‌بندی در آذرماه ۱۳۸۷ آغاز شده است [۲۵].

ناوگان بارگیری معدن، شامل ماشین‌های بیل مکانیکی و لودر است. مشخصات دو دستگاه بیل مکانیکی مورد مطالعه در این مقاله در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است [۲۶].

جدول ۳ ماشین‌های بیل مکانیکی مورد مطالعه

مدل	شرکت سازنده	
E 485	نیولند ^۱	۱
PC 400	کوماتسو ^۲	۲

جدول ۴ مشخصات فنی ماشین‌های بیل مکانیکی مورد مطالعه

واحد	مقادیر		مشخصات
	نیولند	کوماتسو	
کیلووات	۲۵۳/۵	۲۲۸	قدرت موتور
لیتر	۹/۸	۱۱	حجم موتور
کیلوگرم	۴۸۶۰۰	۴۱۴۰۰	وزن در حال کار
متر مکعب	۱/۷	۱/۸	حجم جام
میلی متر	۷۲۲۶	۷۶۸۵	حداکثر عمق حفاری
میلی متر	۱۱۳۰۸	۱۰۸۳۰	حداکثر طول دسترسی
میلی متر	۱۰۷۰۷	۱۰۲۹۵	ارتفاع دسترسی
میلی متر	۷۵۳۱	۷۰۵۵	حداکثر ارتفاع بارگیری
میلی متر	۳۴۹۰	۳۳۴۰	عرض
میلی متر	۳۳۱۰	۳۲۶۵	ارتفاع
لیتر	۶۶۳	۶۰۵	مخزن سوخت
لیتر	۳۰۰	۲۷۰	سیستم هیدرولیک

1. New Holland
2. Komatsu



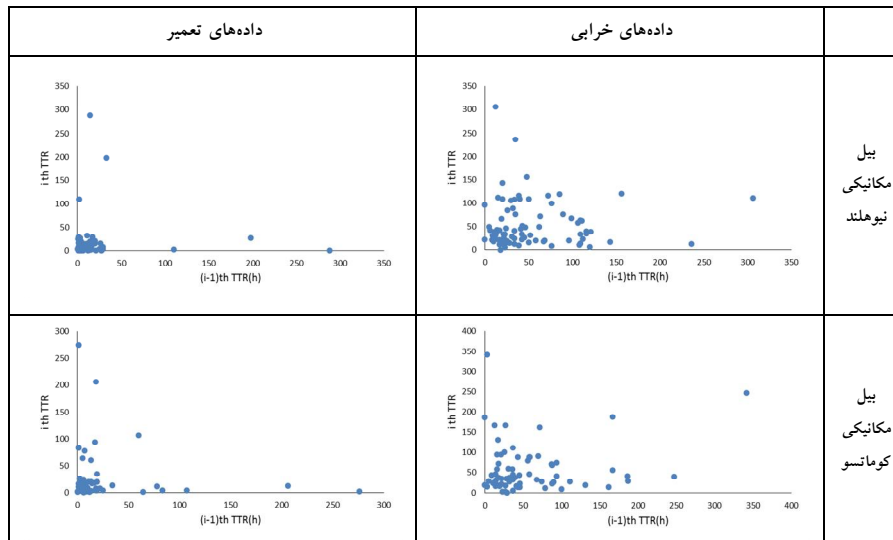
داده‌ها شامل زمان عملیاتی، زمان آماده به کار، علت توقف، مدت توقف و مدت تعمیر ماشین‌ها می‌باشد که در یک دوره زمانی ۱۳ ماهه براساس فرم‌های پایش روزانه عملکرد ماشین‌الات جمع‌آوری شده است. از این داده‌ها، زمان بین خرابی‌ها (TBF) و زمان تعمیر ماشین (TTR) جهت استفاده در فرایند مدلسازی استخراج شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدت زمان کارکرد عملیاتی ماشین‌ها برای بیل مکانیکی نیوهلند و کوماتسو به ترتیب در حدود ۴۵۰۰ و ۴۱۰۰ ساعت بوده و مدت زمان تعمیر نیز به ترتیب در حدود ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت می‌باشد.

۶-۱- آزمون‌های استقلال و مانایی داده‌ها

همان‌طور که اشاره شد، در این مقاله از آزمون هندبوک نظامی برای تشخیص وجود یا عدم وجود روند، استفاده شده است. نتایج آزمون روند با شاخص U و در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای داده‌های خرابی و تعمیر مربوط به ماشین‌های بیل مکانیکی مورد مطالعه، در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به رد نشدن فرض صفر آزمون که نشان‌دهنده عدم وجود روند است، از فرایند تجدیدشونده برای مدلسازی استفاده می‌شود. نتایج آزمون همبستگی رتبه یک برای داده‌های مربوط به زمان خرابی و زمان تعمیر ماشین‌های بیل مکانیکی در شکل ۴ ارائه شده است.

جدول ۵ نتایج آزمون تحلیلی روند داده‌های خرابی و تعمیر

ماشین	نوع داده	درجه آزادی	پارامتر U محاسبه شده	نتیجه آزمون فرض در سطح اطمینان ۹۵ درصد	روش مدلسازی
نیوهلند	TBF	۱۶۸	۱۴۱/۶۲	($< 111/86$) رد نمی‌شود.	فرایند تجدیدشونده
	TTR	۱۶۸	۲۴۵/۹۷	($< 139/03$) رد نمی‌شود.	فرایند تجدیدشونده
کوماتسو	TBF	۱۳۸	۱۱۳/۰۸	($< 111/86$) رد نمی‌شود.	فرایند تجدیدشونده
	TTR	۱۳۸	۱۶۶/۴۴	($< 111/86$) رد نمی‌شود.	فرایند تجدیدشونده



شکل ۴ نتایج آزمون همبستگی مرتبه ۱ برای داده‌های خرابی و تعمیر

۶-۲- محاسبه نرخ خرابی و تعمیر ماشین‌ها

عدم وجود روند و همبستگی، نشان‌دهنده استقلال و مانا بودن داده‌های خرابی و تعمیر می‌باشد. بنابراین برای به‌دست آوردن تابع چگالی داده‌ها از آمار کلاسیک به روش برازش توابع مناسب بر داده‌ها استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۶ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که از آزمون کلموگروف - اسمیرنوف جهت نیکویی برازش استفاده شده است.

جدول ۶ نتایج برازش توزیع برای داده‌های خرابی و تعمیر

ماشین	نوع داده	بهترین توزیع برازش شده (آزمون کلموگروف اسمیرنوف)	آماره آزمون	پارامتر
نیولند	زمان بین خرابی	توزیع نمایی	۰/۱۲۱۵۵	$\lambda = 0.019$
	زمان تعمیر	توزیع نمایی	۰/۲۰۷۴۳	$\mu = 0.064$
کوماتسو	زمان بین خرابی	توزیع نمایی	۰/۱۱۳۹	$\lambda = 0.017$
	زمان تعمیر	توزیع نمایی	۰/۲۸۸۰۹	$\mu = 0.047$



۶-۳- محاسبه قابلیت دسترسی سیستم بارگیری

با جایگذاری پارامترهای محاسبه شده (جدول ۶) در ماتریس احتمالات تغییر حالت تصادفی (رابطه ۳) مطابق رابطه (۴) احتمالات حدی حالت‌های سیستم را به صورت روابط (۵) تا (۸) به دست می‌آیند.

$$0.964 P_1 + 0.064 P_2 + 0.047 P_3 = P_1 \quad (5)$$

$$0.019 P_1 + 0.919 P_2 + 0.047 P_4 = P_2 \quad (6)$$

$$0.017 P_1 + 0.934 P_3 + 0.064 P_4 = P_3 \quad (7)$$

$$0.017 P_2 + 0.019 P_3 + 0.882 P_4 = P_4 \quad (8)$$

با حل معادلات روابط (۵) تا (۸)، احتمال هریک از چهار حالت سیستم بارگیری به صورت رابطه (۹) محاسبه خواهد شد.

$$P_1 = 0.565 \quad P_2 = 0.167 \quad P_3 = 0.207 \quad P_4 = 0.061 \quad (9)$$

بنابراین، طبق رابطه (۲)، قابلیت دسترسی سیستم بارگیری بیل‌های مکانیکی معدن به صورت رابطه (۱۰) تعیین می‌شود.

$$A = P_1 + P_2 + P_3 = 0.939 \quad (10)$$

۷- نتایج و بحث

نتایج آزمون نیکویی برآزش نشان می‌دهد که رفتار خرابی هریک از ماشین‌های بیل مکانیکی مورد مطالعه از توزیع نمایی تبعیت نموده و دارای نرخ خرابی ثابت می‌باشند. ثابت بودن نرخ خرابی و عدم وابستگی آن به زمان گویای این مهم است که ماشین‌آلات در بازه زمانی عمر



مفید خود قرار داشته و در دوره فرسودگی نیستند. محاسبات نشان می‌دهد که نرخ خرابی برای بیل مکانیکی نیوهلند و کوماتسو به ترتیب برابر ۰/۰۱۹ و ۰/۰۱۷ خرابی در ساعت و نرخ تعمیر نیز به ترتیب ۰/۰۶۴ و ۰/۰۴۷ می‌باشد.

مشابه‌بودن مشخصات عملیاتی ماشین‌های بیل مکانیکی مورد مطالعه و نیز شرایط عملیاتی یکسان سبب می‌شود که بتوان رفتار خرابی و تعمیرات صورت گرفته بر ماشین‌ها را مقایسه نمود. بالاتر بودن نرخ خرابی بیل مکانیکی نیوهلند نسبت به بیل مکانیکی کوماتسو نشان‌دهنده تعداد خرابی بیشتر در واحد زمان برای این ماشین می‌باشد. همچنین با توجه به بزرگ‌تر بودن نرخ تعمیر بیل مکانیکی نیوهلند، می‌توان دریافت که میانگین زمان تعمیرات صورت گرفته بر روی این ماشین، کمتر از بیل مکانیکی کوماتسو بوده است.

در مدلسازی به روش مارکوف، چهار حالت ممکن برای سیستم بارگیری معدن متشکل از دو دستگاه بیل مکانیکی، در نظر گرفته شده است که در سه حالت آن سیستم فعال و در حالت چهارم که نشان‌دهنده خرابی هر دو ماشین است، سیستم غیرفعال می‌باشد. بنابراین قابلیت دسترسی سیستم از حاصل جمع احتمال سه حالت فعال بودن سیستم محاسبه می‌گردد.

۸- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های تعیین کیفیت عملکرد سیستم ماشین‌آلات با هدف بهبود مدیریت ماشین‌آلات تولیدی، ارزیابی دسترسی پذیري آنهاست. روش مارکوف برای مدلسازی رفتار اتفاقی و در نتیجه قابلیت دسترسی سیستم‌هایی نظیر ماشین‌آلات بارگیری در معادن روباز که به طور پیوسته و یا ناپیوسته نسبت به زمان و یا در فضای حالت در تغییرند، روش بسیار مناسبی است. با توجه به اینکه روش مارکوف بر مبنای حالت‌های مختلف سیستم و نحوه گذر از حالتی به حالت دیگر است، تحلیل داده‌ها و تعیین نرخ‌های خرابی و تعمیر از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. از این رو در این مقاله از آزمون‌های آماری مرتبط برای صحت‌سنجی و دقت بالاتر تحلیل داده‌ها، استفاده شده است تا تشخیص رفتار خرابی و تعمیر سیستم از دقت بالایی برخوردار باشد.



تحلیل انجام شده بر داده‌های میدانی مربوط به عملکرد دو دستگاه بیل مکانیکی در معدن سنگ آهن میشدوان نشان می‌دهد که رفتار خرابی و تعمیرات انجام شده بر ماشین‌ها از توزیع نمایی تبعیت می‌کنند. بر این اساس محاسبات حاصل از مدلسازی گویای آن است که سیستم بارگیری دارای قابلیت دسترسی ۹۳/۹ درصد می‌باشد و احتمال توقف کامل سیستم تنها ۶/۱ درصد است.

در تحقیقات آینده می‌توان از دیگر روش‌ها نظیر رویکرد شبیه‌سازی گسسته پیشامد جهت محاسبه دسترس‌پذیری و اعتبار سنجی مدل ارائه شده در این مقاله نیز بهره گرفت.

۹- منابع

- [1] Ascher H., Feingold H. (1984) *Repairable systems reliability*, Marcel Dekker, New York.
- [2] Billinton R., Allan R.N. (1983) *Reliability evaluation of engineering systems*, Plenum Press, New York.
- [3] Buzacott J. A. (1970) "Markov approach to finding failure times of repairable systems", *IEEE Transactions on Reliability*, 19(4): 128-134.
- [4] Bobbio A., Premoli A., Saracco O. (1980) "Multi-state homogeneous Markov models in reliability analysis", *Microelectronics Reliability*, 20 (6): 875-880.
- [5] Kitchin J. F. (1988) *Practical Markov modeling for reliability analysis*, Reliability and Maintainability Symposium, Proceedings, Annual, IEEE.
- [6] Topuz E., Duan C. (1991) "An analytical approach to evaluation of the operational effectiveness of continuous mining systems", *Mining Science and Technology*, 12(2):145-155.
- [7] Ouhbi B., Limnios N. (1997) "Reliability estimation of semi-Markov systems: a case study", *Reliability Engineering & System Safety*, 58(3): 201-204.
- [8] Li W., Alfa A. S., Zhao Y. Q. (1998) "Stochastic analysis of a repairable system with three units and two repair facilities", *Microelectronics Reliability*, 38(4): 585-595.



- [9] Whittaker J. A., Rekabb K., Thomasonc M.G. (2000) "A Markov chain model for predicting the reliability of multi-build software", *Information and Software Technology*, 42(12): 889-894.
- [10] Wang J. L., Pham H. (2004) "Markov-chain based reliability analysis for distributed systems", *Computers & Electrical Engineering*, 30 (3): 183-205.
- [11] Kumar R., Jackson A. (2009) *Accurate reliability modeling using Markov Analysis with non-constant hazard rates*, Aerospace Conference, IEEE.
- [12] Pang Y., Huang H.Z., Liu Y., Miao Q., Wang Z., (2009) *Reliability analysis of a repairable parallel system with repair time omission*, Reliability, Maintainability and Safety, ICRMS 2009, 8th International Conference, IEEE.
- [13] Liu R., Liu Z., Su L. (2011) "A two-unit repairable system with a variant vacation policy", *Journal of Computational Information Systems*, 7(11): 3908-3915.
- [14] Jackson A. (2013) *Reliability modeling that combines Markov analysis and Weibull distributions*, Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Proceedings-Annual, IEEE.
- [15] Malefaki S., Limnios N., Dersin P. (2014) "Reliability of maintained systems under a semi-Markov setting", *Reliability Engineering & System Safety*, 131: 282-290.
- [16] Timashev, S., Bushinskaya A. (2015) "Markov approach to early diagnostics, reliability assessment, residual life and optimal maintenance of pipeline systems", *Structural Safety*, 56: 68-79.
- [17] Jones J. V. (2006) *Integrated logistics support handbook*.
- [18] Dhillon B. S. (2008) *Mining equipment reliability, maintainability, and safety*, Springer.
- [19] Kececioglu D. (2002) *Reliability engineering handbook*, Vol. 2.
- [20] Rigdon S. E., Basu A. P. (2000) *Statistical methods for the reliability of repairable systems*, Wiley, New York.



- [21] Hoseinie S. H., Ataie M., Khalookakaei R., Kumar U. (2011) "Reliability modeling of hydraulic system of drum shearer machine", *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 17(4): 450-456.
- [22] Kumar U., Lule H. I. (1990) *Reliability analysis of load-haul-dump machines*, Lulea University of Technology, Division of Mining Equipment Engineering.
- [23] US Department of Defense (2011) *Reliability growth management*, MIL-HDBK-189C, USA.

[۲۴] رونالد آلن، بیلنتون روی (۱۳۹۰) *ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی مفاهیم و روش‌ها*، ترجمه محسن رضاییان، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[۲۵] سلطانی م.، صیادی الف.، مهرگان م.، عابدی م. (۱۳۹۱) «ارائه رویکرد ترکیبی *DEA-AP* برای رتبه‌بندی کارایی معادن سنگ آهن ایران»، *فصلنامه مدیریت پژوهش‌های منابع انسانی*، دوره ۲، شماره ۳، صص ۴۵-۶۴.

[۲۶] دلقندی س. ح. (۱۳۹۲) *تحلیل قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری بیل‌های مکانیکی در معادن روباز مطالعه موردی: معدن سنگ آهن میشدوان*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.