مقایسه دو روش بلوک دیاگرام و فرآیند مارکوف برای محاسبه قابلیت دسترسی سیستم بارگیری معادن

سید حامد دلقندی؛ احمدرضا صیادی ؛ سید هادی حسینی

چکیده

روش‌های متعددی برای ارزیابی قابلیت دسترسی سیستم‌های مهندسی وجود دارد. دو روش عمده مورداستفاده روش بلوک دیاگرام و فرآیند مارکوف است. هدف این مقاله مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه قابلیت دسترسی سیستم بارگیری معدن به دو روش بلوک دیاگرام و مارکوف است. در این مقاله داده‌های خرابی و تعمیر نگهداری ناوگان بیل مکانیکی معدن سنگ‌آهن میشدوان موردمطالعه قرار گرفته است. 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. بر اساس نتایج اخذشده، قابلیت دسترسی محاسبه‌شده در هر دو روش با هم برابر و ۹۳/۹ درصد برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: ***سیستم بارگیری؛ قابلیت دسترسی؛ بلوک دیاگرام؛ فرآیند مارکوف***

1- مقدمه

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم‌های تعمیر پذیر، قابلیت دسترسی (Availability) یا دسترس‌پذیری می‌باشد که مفهوم آن احتمال یافتن سیستم در شرایط لازم برای عملکرد در آینده است [۱]. علاوه بر اینکه این ویژگی برای بیان کیفیت عملکرد ماشین‌آلات و سیستم به کار گرفته می‌شود، آگاهی از قابلیت دسترسی هر ماشین، برنامه‌های عملیاتی ماشین در فرایند تولید را دقیق‌تر و واقعی‌تر می‌کند. به‌عنوان‌مثال دانستن احتمال کارکرد یک ماشین در آینده به برنامه‌ریزان کمک خواهد کرد تا مقدار کارکرد ماشین در فرایند تولید را به‌درستی برآورد و فعالیت‌های سایر ماشین‌آلات که وابسته به میزان دسترس‌پذیری ماشین موردنظر است را به‌درستی برنامه‌ریزی کنند. پیامد برنامه‌ریزی دقیق‌تر در فرایندهای تولید، برآوردن به‌موقع 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. دو روش عمده مدل‌سازی قابلیت دسترسی سیستم، روش تحلیل مستقیم یا بلوک دیاگرام و فرآیند مارکوف می‌باشد. در روش تحلیل مستقیم، قابلیت دسترسی هر یک از اجزا به‌صورت جداگانه محاسبه شده و با توجه به ترکیب قرار گرفتن اجزای سیستم، قابلیت دسترسی کل سیستم محاسبه می‌گردد. این روش برای مدل‌سازی و ارزیابی قابلیت دسترسی سیستم‌های با ساختار ساده، مناسب است. برای تحلیل سیستم‌های پیچیده‌تر به‌ویژه در سیستم‌های تعمیر پذیر که مدت‌زمان تعمیر کوتاه و قابل‌اغماض نیست، از روش‌های دیگر نظیر روش مارکوف استفاده می‌شود [۱]. این روش، برای مدل‌سازی رفتار اتفاقی سیستم‌هایی که به‌طور پیوسته و یا گسسته نسبت به زمان و یا در فضای حالت در تغییرند، قابل‌استفاده است. در فرآیند مارکوف، احتمال قرار گرفتن در هر یک از حالت‌ها و گذر از هر حالت به حالت دیگر در سیستم موردمطالعه مشخص شده و بر مبنای

آنکه در حالت حدی احتمال حالت‌ها تغییر نمی‌کند، مقادیر نهایی احتمال قرار گرفتن در حالت‌های مختلف، محاسبه می‌گردد.

در ادامه برخی از تعاریف و مفاهیم مورداستفاده در این مقاله تعریف می‌شوند.
زمان بین خرابی‌ها (TBF)[۱]: فاصله زمانی بین خرابی‌های متوالی یک بخش یا قطعه تعمیر پذیر از دستگاه [۲].
این زمان درواقع حدفاصل بین راه‌اندازی سیستم بعد از هر تعمیر تا وقوع توقف سیستم به علت خرابی می‌باشد.
زمان تعمیرات (TTR)[۲]: زمان موردنیاز برای رفع نقص یا تعمیر بخش خراب‌شده دستگاه [۲].
قابلیت دسترسی (دسترس‌پذیری): احتمال عملکرد مطلوب سیستم در شرایط معین و در یک بازه از زمان [۲].
نرخ خرابی[۳]: تعداد ازکارافتادگی‌های سیستم در محدوده زمانی که سیستم در حال کار بوده است [۱].
نرخ تعمیر[۴]: تعداد تعمیرات با بازیافت صحت سیستم در محدوده زمانی که سیستم تحت تعمیر قرار داشته است [۱].

2- مطالعه موردی: بیل مکانیکی در معدن میشدوان

معدن میشدوان در ۳۵ کیلومتری شمال شهرستان بافق و در ۱۷ کیلومتری شمال معدن چغارت واقع شده است. طرح ایجاد ظرفیت سنگ‌آهن دانه‌بندی معادن میشدوان با هدف استخراج سنگ‌آهن برای تولید ۶۰۰ هزار تن سنگ‌آهن دانه‌بندی اجرا شده است. ذخیره قابل‌استخراج معدن ۸/۵ میلیون تن با عیار ۳۸ درصد قابل‌استفاده در تولید کنسانتره و ۳/۳ میلیون تن با عیار ۵۹ درصد قابل‌استفاده در تولید دانه‌بندی است. عملیات استخراج به صورت روباز پلکانی (Open Pit) می‌باشد. ناوگان بارگیری، شامل ماشین‌های بیل مکانیکی و لودر است که در این مقاله دو دستگاه بیل مکانیکی موردبررسی قرارگرفته جدول ۱ است. داده‌های شامل زمان عملیاتی، زمان آماده‌به‌کار، علت توقف، مدت توقف و مدت تعمیر ماشین‌ها می‌باشد که در یک دوره زمانی ۱۳ ماهه جمع‌آوری‌شده است.

جدول ۱ ماشین‌های بیل مکانیکی موردمطالعه

	شرکت سازنده	مدل
۱	نیوهلند[۵]	E485
۲	کوماتسو[۶]	PC400

3- محاسبه نرخ خرابی و تعمیر ماشین‌ها

برای محاسبه نرخ خرابی و تعمیر ماشین‌ها، لازم است تابع چگالی توزیع داده‌ها و پارامترهای آن تخمین زده شود به همین منظور به روش آمار کلاسیک و با برازش توزیع مناسب بر داده‌ها، بهترین تابع توزیع به دست آمده که نتایج آن در جدول ۲ قابل‌مشاهده است. لازم به ذکر است که از آزمون کلموگروف- اسمیرنف جهت نیکویی برازش، استفاده شده است.

[۱] Time Between Failures
[۲] Time To Repair
[۳] Failure Rate
[۴] Repair Rate
[5] New Holland
[6] Komatsu

جدول ۲ نتایج برازش توزیع برای داده‌های خرابی و تعمیر

ماشین	نوع داده	بهترین توزیع برازش شده (آزمون کلموگروف- اسمیرنف)	پارامتر
نیوهلند	زمان بین خرابی	توزیع نمایی	$\lambda =$ ۰/۰۱۹
	زمان تعمیر	توزیع نمایی	$\mu =$ ۰/۰۶۴
کوماتسو	زمان بین خرابی	توزیع نمایی	$\lambda =$ ۰/۰۱۷
	زمان تعمیر	توزیع نمایی	$\mu =$ ۰/۰۴۷

4- میانگین زمان بین خرابی و تعمیر

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود با توجه به آزمون نیکویی برازش، بهترین توزیع برازش شده بر داده‌های خرابی و تعمیر هر دو ماشین، توزیع نمایی می‌باشد. میانگین زمان بین خرابی‌ها که برابر مقدار میانگین تابع توزیع احتمال است در توزیع نمایی مقدار آن معکوس نرخ خرابی یا تعمیر می‌باشد که به صورت روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌گردد [۱].

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (۱)$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (۲)$$

که در آن λ و μ به ترتیب نرخ خرابی و تعمیر، $MTBF$ متوسط زمان بین خرابی‌ها و $MTTR$ متوسط زمان تعمیر می‌باشند؛ بنابراین میانگین زمان بین خرابی و تعمیر مطابق جدول 3 و جدول ۴ به دست می‌آیند.

جدول 3 نرخ خرابی و میانگین زمان بین خرابی‌ها

ماشین	نرخ خرابی	میانگین زمان بین خرابی‌ها
نیوهلند	$\lambda =$ ۰/۰۱۹	$MTBF =$ ۵۲/۶۳
کوماتسو	$\lambda =$ ۰/۰۱۷	$MTBF =$ ۵۸/۸۲

جدول ۴ نرخ تعمیر و میانگین زمان تعمیر

ماشین	نرخ تعمیر	میانگین زمان تعمیر
نیوهلند	$\mu =$ ۰/۰۶۴	$MTTR =$ ۱۵/۶۳
کوماتسو	$\mu =$ ۰/۰۴۷	$MTTR =$ ۲۱/۲۸

5- محاسبه قابلیت دسترسی سیستم بارگیری

قابلیت دسترسی (دسترس‌پذیری) عبارت است از احتمال عملکرد مطلوب سیستم در شرایط معین و در یک بازه زمانی مشخص [۲]. قابلیت دسترسی را می‌توان با استفاده از متوسط زمان بین خرابی و متوسط زمان تعمیر، به‌صورت رابطه (۱) محاسبه نمود [۳].

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (۳)$$

که در آن A قابلیت دسترسی، $MTBF$ متوسط زمان بین خرابی‌ها و $MTTR$ متوسط زمان تعمیر می‌باشند.

5-1- روش بلوک دیاگرام

در این روش، قابلیت دسترسی هر یک از اجزا به‌صورت جداگانه محاسبه شده و با توجه به ترکیب قرار گرفتن اجزای سیستم، قابلیت دسترسی کل سیستم محاسبه می‌گردد. با توجه به رابطه ۳ و اطلاعات جداول ۳ و ۴،

قابلیت دسترسی هر یک از ماشین‌ها مطابق روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌گردد.

$$A_N = \frac{52.632}{52.632 + 15.625} = 0.771 \qquad (۴)$$

$$A_K = \frac{58.824}{58.824 + 21.277} = 0.734 \qquad (۵)$$

که در آن A_N و A_K به ترتیب قابلیت دسترسی بیل مکانیکی نیوهلند و کوماتسو می‌باشند.
سیستم بارگیری معدن هنگامی متوقف می‌شود که هر دو ماشین خراب باشد و این به معنای موازی بودن عملکرد ماشین‌ها می‌باشد، قابلیت دسترسی سیستم‌های متشکل از دو جز موازی به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌گردد[۲] که در آن A_N ،A_K و A_{sys} به ترتیب قابلیت دسترسی بیل مکانیکی نیوهلند،کوماتسو و کل سیستم می‌باشند.

$$A_{sys} = 1-(1-A_N)(1-A_K) \qquad (۶)$$

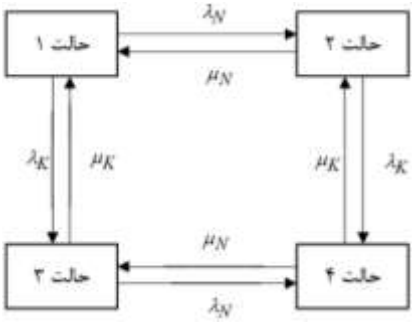
بنابراین قابلیت اطمینان سیستم بارگیری معدن به صورت رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$A_{sys} = 1-(1-0.771)(1-0.734) = 0.939 \qquad (۷)$$

2-5- روش مارکوف

در روش مارکوف لازم است با شناخت و تحلیل مناسب از عملکرد سیستم، ابتدا کلیه حالت‌های ممکن برای سیستم شناسایی شده و روند جابجایی بین حالت‌ها تعیین شود. در این تحقیق مدل مارکوف برای دو ماشین N و K که به ترتیب نشان‌دهنده بیل مکانیکی نیوهلند و کوماتسو بوده و دارای عملکرد مستقل می‌باشند، در نظر گرفته‌شده است. بر همین مبنی حالات ممکن مجموعه سیستم به‌صورت شکل ۱ قابل‌ارائه است که در آن λ و μ نمایانگر نرخ خرابی و نرخ تعمیر می‌باشند.
همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، چهار حالت ممکن برای مجموعه سیستم وجود دارد که با توجه به موازی بودن ارتباط اجزاء تشکیل‌دهنده آن، وضعیت کل سیستم برای حالات مختلف به صورت زیر قابل توصیف است:

- حالت ۱: هردو ماشین سالم
- حالت ۲: بیل مکانیکی نیوهلند خراب و بیل مکانیکی کوماتسو سالم
- حالت ۳: بیل مکانیکی نیوهلند سالم و بیل مکانیکی کوماتسو خراب
- حالت ۴: هردو ماشین خراب



شکل ۱ نمودار فضای حالات سیستم بارگیری معدن

با توجه به موازی بودن ارتباط اجزاء، سیستم بارگیری در حالت‌های ۱، ۲ و ۳ فعال و تنها در حالت ۴ که هر دو ماشین خراب باشد، غیرفعال است؛ بنابراین قابلیت دسترسی سیستم بارگیری به‌صورت رابطه ۸ محاسبه می‌گردد؛

که در آن A قابلیت دسترسی سیستم و P_j معرف احتمال قرار گرفتن سیستم در حالت j است.

$$A_{sys} = P_1 + P_2 + P_3 \qquad (۸)$$

برای محاسبه احتمال حالت‌های مختلف، باید ماتریس احتمالات تغییر حالت تصادفی سیستم را تشکیل داد و با توجه به فضای حالات ممکن، این ماتریس به‌صورت رابطه ۹ ارائه می‌شود.

$$\begin{bmatrix} 1-(\lambda_N+\lambda_K) & \lambda_N & \lambda_K & 0 \\ \mu_N & 1-(\lambda_K+\mu_N) & 0 & \lambda_K \\ \mu_K & 0 & 1-(\lambda_N+\mu_K) & \lambda_N \\ 0 & \mu_K & \mu_N & 1-(\mu_N+\mu_K) \end{bmatrix} \qquad (۹)$$

در شرایط حدی میزان احتمال قرار گرفتن و گذر از حالت‌های سیستم تغییر نمی‌کند در این صورت چنانچه α نمایانگر بردار احتمالات حدی (رابطه ۹) و P ماتریس احتمالات تغییر حالت تصادفی باشد، خواهیم داشت:

$$\alpha P = \alpha \qquad (۱۰)$$

با جایگذاری پارامترهای محاسبه شده (جدول ۲) در ماتریس احتمالات تغییر حالت تصادفی (رابطه ۹) مطابق رابطه (۱۰) احتمالات حدی حالت‌های سیستم را به صورت روابط (۱۱) تا (۱۴) به دست می‌آیند.

$$P_3 = P_1 \text{ ۰/۰ } P_1 + \text{ ۹۶۴/۰ } P_2 + \text{ ۰۶۴/۰۴۷} \qquad (۱۱)$$

$$P_4 = P_2 \text{ ۰/۰ } P_1 + \text{ ۰۱۹/۰ } P_2 + \text{ ۹۱۹/۰۴۷} \qquad (۱۲)$$

$$P_4 = P_3 \text{ ۰/۰ } P_1 + \text{ ۰۱۷/۰ } P_3 + \text{ ۹۳۴/۰۶۴} \qquad (۱۳)$$

$$P_4 = P_4 \text{ ۰/۰ } P_2 + \text{ ۰۱۷/۰ } P_3 + \text{ ۰۱۹/۸۸۲} \qquad (۱۴)$$

با حل معادلات روابط (۱۱) تا (۱۴)، احتمال هر یک از چهار حالت سیستم بارگیری به‌صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\text{۰ } P_1 = /۵۶۵ \qquad \text{۰ } P_2 = /۱۶۷ \qquad \text{۰ } P_3 = /۲۰۷ \qquad \text{۰ } P_4 = /۰۶۱$$

بنابراین، طبق رابطه (۸)، قابلیت دسترسی سیستم بارگیری بیل‌های مکانیکی معدن به‌صورت رابطه (۱۵) تعیین می‌گردد.

$$A = P_1 + P_2 + P_3 = \text{۰/۹۳۹} \qquad (۱۵)$$

نتیجه

نتایج آزمون نیکویی برازش نشان می‌دهد که رفتار خرابی هر یک از ماشین‌های بیل مکانیکی موردمطالعه 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.

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.

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. میانگین زمان بین خرابی‌ها که برابر مقدار میانگین تابع توزیع احتمال است در توزیع نمایی مقدار آن معکوس نرخ خرابی یا تعمیر می‌باشد، بر این اساس در بیل مکانیکی نیوهلند، به‌طور متوسط هر ۵۲/۶ ساعت، خرابی رخ می‌دهد که در هر بار وقوع خرابی، زمان متوسط تعمیر آن در حدود ۱۵/۶ ساعت به طول می‌انجامد. این زمان‌ها برای بیل مکانیکی کوماتسو به ترتیب در حدود ۸۵/۸ ساعت و ۲۱/۳ می‌باشد.

قابلیت دسترسی عبارت است از احتمال عملکرد مطلوب سیستم در شرایط معین و در یک بازه زمانی مشخص و مقدار آن برای هر ماشین از تقسیم متوسط زمان بین خرابی‌ها بر مجموع متوسط زمان بین خرابی و متوسط زمان تعمیر، محاسبه می‌گردد. بر این اساس قابلیت دسترسی ماشین نیوهلند و کوماتسو به ترتیب برابر ۷۷/۱ و ۷۳/۴ درصد می‌باشند. با توجه به موازی بودن ترکیب سیستم بارگیری متشکل از دو بیل مکانیکی، قابلیت دسترسی سیستم به روش بلوک دیاگرام برابر ۹۳/۹ درصد به دست آمده است.

در روش مارکوف، چهار حالت ممکن برای سیستم بارگیری در نظر گرفته شده که با تشکیل ماتریس احتمالات تغییر حالت تصادفی و حل معادلات به‌دست‌آمده، احتمال سالم بودن هر دو ماشین ۵۶/۵ درصد، احتمال خرابی نیوهلند و سالم بودن کوماتسو ۱۶/۷ درصد، احتمال خرابی ماشین کوماتسو و سالم بودن نیوهلند ۲۰/۷ درصد و احتمال خرابی هر دو ماشین ۶/۱ درصد محاسبه شده است؛ بنابراین قابلیت دسترسی کل سیستم بارگیری که شامل هر دو ماشین نیوهلند و کوماتسو است، برابر ۹۳/۹ درصد می‌باشد.

با توجه به محاسبات انجام‌شده، قابلیت دسترسی در هر دو روش بلوک دیاگرام و فرآیند مارکوف، یک مقدار به‌دست‌آمده است.

مراجع

[1] Billinton, R. and R.N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems*. 1983: Plenum press New York.

[2] Dhillon, B.S., *Mining equipment reliability, maintainability, and safety*. 2008: Springer.

[3] Kumar, U., *Maintenance strategy for mechanized mining systems*. Licentiate Thesis, Division of Mining Equipment Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1989.

Comparisons of Block Diagram and Markov Methods for Calculating of Mine loading System Availability

Sayed Hamed Delghandi, Ahmad Reza Sayadi, Seyed Hadi Hoseinie

Abstract

There are many methods available to evaluate availability of engineering systems. The two widely used methods are the block diagram and Markov processes.This paper presents a comparison of mine loading system availability results obtained using block diagram and markov method. In this paper, the maintenance data of a fleet of hydraulic excavator deployed at the Mishdowan iron mine has been studied. Failure and repair rate for newholland hydraulic excavator are 0.019 and 0.064 and for komatsu hydraulic excavator are 0.017 and 0.047, respectively. Based on the results obtained, availability of system in both merhods are equal and it is evaluated to be 93.3 percent.

Keywords

Mine loading system, Availability, Block diagram, Markov processes.