مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۳/ صفحه ۱۸۵-۱۹۴

مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

DOI: ****

ارزیابی و تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه‌های حفاری دورانی- مطالعه موردی: معدن سنگ‌آهن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان

سجاد محمدی[۱]، مجید غیاثی[۲]، محمد عطایی[۳،*] و اسحاق پورزمانی[۴]

[۱] دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

[۲] کارشناس ارشد استخراج معدن، شرکت مهندسین مشاور کوشا معدن

[۳] استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

[۴] کارشناس ارشد استخراج معدن، سرپرست دفتر نظارت طراحی امور معدن، شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۱/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

چکیده

معادن روباز به دلیل نرخ تولید بالا و استفاده از دستگاه‌های بزرگ‌مقیاس، دارای ریسک اقتصادی و عملیاتی بسیار بالایی هستند. ازاین‌رو، حصول اطمینان از آماده به‌کار بودن ماشین‌آلات عملیاتی در آن‌ها حائز اهمیت است. در این معادن حفاری، به منظور عملیات انفجاری، اولین مرحله از فرآیند تولید ماده معدنی به‌حساب می‌آید و آماده به‌کار بودن دستگاه‌های مربوطه، دارای تأثیر مستقیم بر تمامی عملیات بعدی و درنتیجه اقتصاد حاصل از کل عملیات است. امروزه با گسترش کاربرد قابلیت اطمینان در حوزه‌های مختلف مهندسی، می‌توان شرایط عملیاتی و در دسترس بودن ماشین‌آلات را از این نظر، مورد ارزیابی و تحلیل قرار داد. یکی از روش‌های قدرتمند در این حوزه، روش مارکوف است که بر اساس نظریه فرآیندهای تصادفی بنا نهاده شده است. در این پژوهش، قابلیت اطمینان دستگاه‌های حفاری دورانی معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان با استفاده از این روش، ارزیابی و تحلیل شده است. برای این منظور، با بررسی داده‌های از کارافتادگی این دستگاه‌ها در مدت ۵ سال و مدل‌سازی شرایط مختلف در دسترس بودن آن‌ها، قابلیت اطمینان محاسبه شده است. بر این اساس، با احتمال ۹۵/۴۲٪ معادل با ۳۴۷ روز کاری از ۳۶۳ روز کل، حداقل ۲ دستگاه برای عملیات حفاری آماده به‌کار و در دسترس هستند.

کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان؛ دستگاه حفاری دورانی؛ فرآیند تصادفی؛ زنجیره مارکوف؛ معدن سنگ‌آهن گل‌گهر سیرجان.

Reliability Analysis and Evaluating of Rotary Drilling Machine – Case Study: Mine No.1 of Golgohar Iron Ore Mine

S. Mohammadi[1], M. Ghiasi[2], M. Ataei[3,*], E. Pourzamani[4]

[1] Ph.D. Candidate, Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

[2] M.sc of Mining Eng., Kusha Ma'dan Consulting Engineers Co. Sirjan, Iran.

[3] Professor, Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

[4] M.sc of Mining Engineering, senior expert at the Bureau of Design Supervision of the Golgohar Co. Sirjan, Iran.

Abstract

Open pit mines have very high economic and operational risk because of high rate of production and using large scale machines. So, it is necessary to guarantee the availability of the operational equipment. First stage of mining in these mines is drilling for blasting and the availability of related machines has direct effect on all subsequent operations and consequently on overall economy of the operation. Today, operation conditions and machines availability can be assessed and analyzed due to development of reliability methods in different engineering fields. Markov method is one of the potent methods in this context which is based on stochastic process theory. In this study, reliability of rotary drilling machines in Golgohar Mine No. 1, Sirjan, is analyzed using this method. In this way, reliability is calculated by investigating failure dad of these machines during 5 years and modeling different conditions of their availability. So, at least 2 machines will be ready and available for drilling operation with the probability of 95.42% corresponding to 347 days out of total 363 working days.

Keywords: Reliability; Rotary Drilling Machine; Stochastic Process; Markov Chain; Golgohar Iron Ore Mine.

* نویسنده مسئول؛ تلفکس: ۳۲۳۹۵۵۰۹ - ۰۲۱

آدرس پست الکترونیک: ataei@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

معدن‌کاری روباز به دلیل نرخ تولید بالا، از بزرگ‌ترین وسایل و ماشین‌آلات ساخته شده دست بشر بهره می‌برد. با توجه به این نرخ، تولید بالا و همچنین هزینه‌های بسیار بالای ماشین‌آلات، ریسک عملیاتی و اقتصادی در این معادن بسیار بالاست. اولین فرآیند در تولید ماده معدنی در معادن روباز، عملیات انفجار است. در این عملیات، اولین اقدام حفاری است که هدف از آن ایجاد چال‌هایی با شکل هندسی و توزیع معین است؛ به‌طوری‌که مواد منفجره و چاشنی آن‌ها بتوانند داخل چال‌ها قرار گیرند. این عملیات در اکثر موارد توسط دستگاه‌های مکانیکی حفاری دورانی[1] صورت می‌گیرد. با توجه به اهمیت این عملیات در چرخه تولید ماده معدنی و همچنین استفاده از دستگاه‌های بزرگ‌مقیاس پیش‌بینی و اطلاع از شرایط عملیاتی و آماده به کار بودن آن‌ها، امری بسیار ضروری است.

امروزه برای رسیدن به این هدف، از مهندسی قابلیت اطمینان بهره گرفته می‌شود. قابلیت اطمینان یک سیستم که به صورت احتمال کارکرد صحیح سیستم در طول بازه زمانی مشخص تعریف می‌شود، یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی عملکرد سیستم است؛ زیرا وقوع وقفه در بهره‌برداری از سیستم‌های صنعتی علاوه بر خسارات مالی می‌تواند به ناکارآمدی سیستم‌ها بینجامد[۱]. از این رو ارزیابی و تخمین قابلیت اطمینان، نقش مهمی را در ارزیابی عملکرد هر سیستم بر عهده دارد. با استفاده از این کمیت، می‌توان احتمال عدم خرابی و عملکرد مطلوب دستگاه در یک بازه زمانی را تخمین زد. این کمیت، امروزه در اکثر صنایع به‌عنوان یک عامل فنی و مدیریتی کمک شایانی به حفظ پیوستگی تولید و بهبود وضعیت مالی بنگاه‌های اقتصادی می‌کند [۲]. ازاین‌رو قابلیت اطمینان ماشین‌آلات در معدن به دلیل تأثیر مستقیم بر عملیات تولید، یکی از مسائل بسیار مهم در این حوزه است.

اگرچه مفهوم قابلیت اطمینان برای اولین بار در سال ۱۹۳۰ ارائه شد و در شاخه‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، اما اولین مطالعات مربوط به آن در حوزه مهندسی معدن به اواخر دهه ۱۹۶۰ باز می‌گردد. در سال ۱۹۶۶ لوکوویچ و چالنکو بر مبنای قابلیت اطمینان تولید، تعداد کارگاه‌های رزرو در روش جبهه کار طولانی را محاسبه کردند [۳]. ازجمله تحقیقات دهه اخیر در این حوزه، می‌توان به این موارد اشاره کرد: تعیین قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری و تعمیرپذیری دستگاه‌های LHD[2] در معادن زیرزمینی [۴]، بررسی قابلیت اطمینان کارخانه فرآوری [۵]، تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه شیرر در روش استخراج جبهه کار بلند [۶]، ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم نوار نقاله [۷]، تحلیل قابلیت اطمینان شبکه تهویه در معدن زغال‌سنگ [۸]، قابلیت اطمینان سیستم تولید در معادن روباز [۹]، تحلیل قابلیت اطمینان خرابی‌های مکانیکی دستگاه‌های دراگلاین[3] [۱۰]، تعیین قابلیت اطمینان ناوگان LHD در یکی از معادن زغال‌سنگ زیرزمینی هند [۱۱]، تخمین قابلیت اطمینان سیستم تهویه مورد استفاده هنگام ساخت تونل‌های طویل [۱۲]، مدل‌سازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان درام شیرر در معادن جبهه‌کار طولانی مکانیزه [۲]، تعیین قابلیت اطمینان ماشین‌های لق‌گیری[4] در معادن زیرزمینی [۱۳]، استفاده از قابلیت اطمینان به‌منظور تعیین استراتژی تعمیرات برای بررسی قابلیت خودکار کردن دستگاه‌های عملیاتی LHD [۱۴]، کاربرد قابلیت اطمینان برای تعیین برنامه تعمیر و نگهداری به‌منظور بهبود تولید ماشین‌آلات معادن روباز [۱۵]، مدل‌سازی و تحلیل عملکرد دستگاه‌های LHD [۱۶]، تحلیل قابلیت اطمینان ناو زنجیری در استخراج جبهه‌کاربلند مکانیزه [۱۷]، بهینه‌سازی تخصیص قابلیت اطمینان برای سیستم تولید معادن روباز [۱۸] و سیستم تهویه معدن زیرزمینی [۱۹].

از روش‌های پرکاربرد در ارزیابی قابلیت اطمینان، می‌توان به روش تحلیل آماری، تحلیل درخت خطا، تحلیل انواع از کارافتادگی‌ها و تأثیرات آن‌ها و روش مارکوف اشاره کرد که از این میان روش تحلیل آماری، به‌عنوان روش اصلی و عمومی تحلیل قابلیت اطمینان شناخته می‌شود که در اکثر موارد بالا از آن بهره گرفته شده است. روش مارکوف نیز، به‌واسطه بنیان ریاضیاتی خود روشی قدرتمند برای پیش‌بینی و ارزیابی قابلیت اطمینان است که تاکنون در موارد مختلفی

[1] Rotary Drilling Machine

[2] Load Haul Dump (LHD)
[3] Dragline
[4] Scaling Machine

استفاده شده است. ازجمله پژوهش‌ها در حوزه قابلیت اطمینان در مهندسی معدن که در آن‌ها از روش مارکوف بهره گرفته شده است، می‌توان به کارهای سامانتا در ۲۰۰۴ [۴]، جلالی و فروهنده در ۲۰۱۱[۱۲] و گوستافسون در ۲۰۱۳ [۱۴] اشاره کرد.

در مطالعه حاضر، با تمرکز بر معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان (بزرگ‌ترین معدن سنگ‌آهن کشور) قابلیت اطمینان دستگاه‌های حفاری آن، مورد بررسی قرار گرفته است. ازآنجایی‌که حفاری اولین قدم برای تولید ماده معدنی است، بنابراین حصول اطمینان از عملکرد صحیح و در دسترس بودن این دستگاه‌ها حائز اهمیت است. برای این منظور، با مطالعه و بررسی داده‌های از کارافتادگی ثبت شده برای این دستگاه‌ها در واحد تعمیرات به مدت ۵ سال و با استفاده نظریه فرآیندهای تصادفی و روش زنجیره مارکوفی، قابلیت اطمینان آن‌ها محاسبه شده است.

۲- روش تحقیق

در این مقاله، تحلیل قابلیت اطمینان زنجیره مارکوفی بر اساس اصول فرآیندهای احتمالی پیشنهاد شده است. روش مارکوف، یکی از توانمندترین و پرکاربردترین روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان است. این روش، بر مبنای حالت‌های سیستم استوار بوده، با حل معادلات دیفرانسیلی سیستم، قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه می‌نماید [۲۰ و ۲۱]. این روش، برای مدل‌سازی رفتار اتفاقی سامانه‌هایی کاربردپذیر است که به‌طور پیوسته و یا ناپیوسته نسبت به زمان و یا در فضای حالت در تغییر هستند. این تغییرات پیوسته و یا ناپیوسته اتفاقی را اصطلاحاً فرآیند تصادفی[1] می‌نامند. برای این‌که بتوان روش مارکوف را به کار برد، رفتار سیستم باید نمایانگر فقدان حافظه باشد، یعنی حالت و وضعیت آینده سیستم باید مستقل از وضعیت‌های گذشته، به‌جز آخرین وضعیت آن باشد؛ بنابراین رفتار اتفاقی آتی یک سیستم صرفاً باید بستگی به وضعیت حال آن داشته و هیچ‌گونه وابستگی به گذشته آن و یا چگونگی حصول وضعیت حال نداشته باشد؛ به‌عبارت‌دیگر، رفتار سیستم باید در همه مقاطع زمانی یکسان و احتمال تبدیل وضعیت آن به وضعیت‌های دیگر همواره در همه زمان‌ها ثابت بماند [۲۲].

با در نظر گرفتن {X(n)} به عنوان یک فرایند تصادفی و {S(n)} به عنوان حالت‌های فرایند تصادفی، اگر رابطه زیر برقرار باشد، گفته می‌شود که فرایند در ویژگی مارکوف صدق می‌کند:

$$P[X(n+1)=S(n+1) \mid X(n)=S(n), X(n-1),..., X(0)=S(0)] = P[X(n+1)=S(n+1) \mid X(n)=S(n)]$$

بنابراین فرایندی تصادفی که در ویژگی مارکوف صدق کند، فرایند مارکوف است. به طورکلی در فرایند مارکوف، هم زمان و هم فضا به شکل پیوسته و یا ناپیوسته قابل تلقی است. از این رو، حالت گسسته فرایند مارکوف را زنجیره مارکوف می‌نامند. واژه زنجیر به این نکته اشاره دارد که هر برآمد به برآمد بلافاصله پیش از خودش وابسته است. در ارزیابی قابلیت اطمینان به‌طور اخص، معمولاً فضا را به‌عنوان تابع ناپیوسته ارائه می‌کنند؛ زیرا موقعیت مکانی به‌صورت ناپیوسته هویت پذیر و مشخص‌کننده محل استقراری برای یک سیستم و اجزای آن است؛ درحالی‌که زمان، هم به‌صورت پیوسته و هم ناپیوسته می‌تواند منظور شود [۲۲].

یک رشته متغیرهای تصادفی X1, X2, X3, …, Xn را زنجیره مارکوف می‌نامند، اگر به ازای تمام مقادیر N و تمام حالت‌های i و j رابطه زیر برقرار باشد [۲۳]:

$$P[X_n = j \mid X_1 = i_1, X_2 = i_2, ..., X_n = i] = P[X_{n+1} = j \mid X_n = i]$$

به عبارت دیگر، رشته متغیرهای تصادفی عنوان شده اگر دو ویژگی زیر را برآورده سازد، فرایند تصادفی زنجیر مارکوف نامیده می‌شود [۲۴].

الف- هر نتیجه به مجموعه متناهی نتایج یعنی {a1, a2, … , am} که فضای حالت دستگاه نامیده می‌شود، متعلق باشد. در این شرایط اگر نتیجه آزمایش n ام، ai باشد، آنگاه دستگاه در زمان n یا در مرحله nام در حالت ai قرار دارد.

ب- نتیجه هر آزمایش تنها به نتیجه آزمایش ماقبل آن وابسته باشد و از نتیجه آزمایش‌های ما قبل دیگر مستقل باشد. به عبارت دیگر، برای هر زوج از حالت‌ها، نظیر (aj , aj) احتمال معینی مانند pij وجود داشته باشد؛ به نحوی که aj بلافاصله بعد از ai رخ دهد.

با توجه به دو ویژگی عنوان شده، در فرآیند تشکیل یک سیستم با مدل مارکف دو عنصر وجود دارد که باید مشخص شوند. این دو عنصر عبارتند از: حالت‌های سیستم یا فضاهای

[1] Stochastic Process

حالت و احتمال حرکات بین حالت‌ها که اصطلاحاً احتمالات گذار نامیده می‌شوند. حالت یک سیستم، موقعیتی از سیستم در یک لحظه زمانی و احتمالات گذار معرف احتمال حرکت سیستم از یک حالت به حالت دیگر در طول یک دوره مشخص است؛ بنابراین احتمال تغیر حالت سیستم از i به j به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p_{ij} = \mathrm{p}(\mathrm{i} \to j) = \mathrm{p}[\mathrm{X=j|X\text{-}1=i}]$$

در این رابطه، pij احتمال گذار حالت iام به حالت jام است و به نام احتمال انتقال۱ خوانده می‌شوند. ان احتمال-های انتقال به صورت ماتریسی آرایش می‌یابند که به نام ماتریس انتقال۲ موسوم است. ماتریس انتقال به‌صورت ماتریسی مربعی است که تعداد سطرها و ستون‌های آن برابر با تعداد فضاهای حالت ممکن است. هرکدام از درایه‌های این ماتریس، بیانگر احتمال گذار یک حالت به حالت دیگر سیستم است. تمام عناصر این ماتریس، غیر منفی است؛ همچنین مجموع عناصر هر سطر برابر با یک است، اما مجموع عناصر یک ستون الزاما یک نیست. باتوجه به نامتناهی بودن تعداد حالت‌های سیستم، ابعاد ماتریس نیز می‌تواند نامتناهی باشد. در زیر ماتریس انتقال Pij که هر یک از درایه‌های آن احتمال انتقال pij را نشان می‌دهد، برای m حالت، ملاحظه می‌شود [۱۲].

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix}$$

بدین ترتیب به هر حالت ai ، سطر iام ماتریس انتقال P، یعنی (Pi1, Pi2,…, Pim) متناظر می‌شود. اگر دستگاه در حالت ai باشد، آنگاه این سطر برداری، همه نتایج محتمل در آزمایش بعدی را ارائه خواهد داد. از آنجا که این بردار نامنفی و مجموع درایه‌های آن برابر با یک است، آن را بردار احتمال۳ می‌نامند. به همین ترتیب، ماتریس انتقال P که هر سطر آن یک بردار احتمال است، ماتریس تصادفی۴ نامیده می‌شود.

چنان‌که گفته شد، درایه pij در ماتریس انتقال Pij احتمال رفتن سیستم از حالت Si به Sj در یک مرحله است؛ بنابراین درایه Pnij باید به‌عنوان احتمال تغییر سیستم از حالت Si به Sj در n- مرحله در نظر گرفته شود. این اعداد جدید مانند Pnij، درایه‌های ماتریس Pn را تشکیل می‌دهند که آن را ماتریس انتقال n- مرحله‌ای می‌نامند [۲].

یکی از مهمترین ویژگی‌های ماتریس تصادفی این است که هر ماتریس تصادفی منظم مثل P دارای یک بردار ثابت۵ یکتا۶، مثل t است که ضرب ماتریس تصادفی از راست، مقدار آن را تغییر نمی‌دهد. به عبارت دیگر برای این ویژگی می‌توان رابطه (۱) را تعریف کرد [۲۵].

$$\begin{cases} t \times P = t \\ \sum_{i=1}^{n} t_i = 1 \end{cases} \qquad (۱)$$

رشته ماتریس‌های انتقال n- مرحله‌ای Pn به تشکیل ماتریس F منجر می‌شود که هر سطر آن بردار احتمال ثابت f است. ازاین‌رو احتمال Pnij که Sj رخ می‌دهد، برای مقادیر به‌اندازه کافی بزرگ n، مستقل از حالت اولیه یعنی Si است و به اعضای fj ماتریس F نزدیک می‌شوند؛ بنابراین تأثیر حالت اولیه یا توزیع اولیه احتمالات فرآیندها در اثر افزایش مراحل فرآیندها از بین می‌رود. از این گذشته، هر رشته از توزیع‌های احتمالات به بردار احتمال ثابت f ماتریس F می‌رسد که توزیع ماندار۷ زنجیره‌های مارکوف نامیده می‌شود.

از سوی دیگر، اگر ماتریس انتقال P در زنجیر مارکوف، یک ماتریس تصادفی منظم باشد، آنگاه برای زمان طولانی احتمال اینکه حالت aj رخ دهد، تقریباً با مولفه tj از بردار احتمال یکتای t ماتریسP برابر است که این بردار t برابر با بردار f ماتریس F و در نتیجه توزیع ماندار است [۲۴].

بنابراین، با محاسبه توزیع ماندار زنجیره مارکوف در حالاتی از سیستم که مطلوب نیستند، امکان محاسبه قابلیت اعتماد سیستم در حالات مذکور وجود خواهد داشت. از این رو برای تعیین توزیع ماندار زنجیر مارکوف یا باید از طریق رابطه ۲-۱۲ بردار احتمال t را محاسبه نمود و یا اینکه ماتریس انتقال تا جایی به توان رساند که اعداد آن ثابت شود.

[1] Transition Probability
[2] Transition Matrix
[3] Probability Vector
[4] Stochastic Matrix

[5] Fixed Vector
[6] Unique
[7] Stationary Distribution

۳- ماشین‌های حفاری دورانی معدن شماره ۱ گل‌گهر

مجموعه معادن گل‌گهر که از جمله ذخایر عظیم، ارزشمند و استراتژیک ایران است، در استان کرمان و به طور تقریبی در مرکز مثلثی به رئوس کرمان، شیراز و بندرعباس واقع شده است. نزدیک‌ترین شهر به این معادن، شهرستان سیرجان است که در ۵۵ کیلومتری شمال شرقی آن قرار دارد [۲۶]. این مجموعه معادن، دارای شش ذخیره است که با اعداد ۱ تا ۶ مشخص می‌شوند. در تحقیق حاضر، دستگاه‌های عملیات حفاری در معدن شماره ۱، مورد بررسی قرار گرفته است. در این معدن، تعداد ۳ دستگاه چالزنی (مشخص شده با نام‌ها A، B و C) با مشخصات یکسان استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها قابلیت حفر چال‌های با قطر ۲۵۱ میلی‌متر و تا عمق ۶۸/۶ را دارا هستند. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی معدن و شکل ۲، نمایی از دستگاه حفاری مورد مطالعه این معدن را نشان می‌دهند.

۴- جمع‌آوری داده‌ها و ساخت مدل

در مدل‌سازی قابلیت اطمینان به روش فرآیند تصادفی اولین قدم، تعریف فضاهای حالت[1] ممکن برای سیستم و قدم دوم در این مدل‌سازی، اطلاع از احتمالات مربوط به تغییر سیستم از هر حالت به حالات دیگر است. در تحلیل قابلیت اطمینان، تعداد و در دسترس بودن دستگاه‌های عملیاتی به طور کلی کلی فضاهای حالت را می‌توان به صورتی در نظر گرفت که در جدول ۱ آورده شده است. در این حالت، برای تعداد m دستگاه تعداد m+1 فضای حالت وجود خواهد داشت.

جدول ۱- فضاهای حالت در حالت کلی برای دستگاه‌های عملیاتی

فضای حالت	دستگاه آماده به کار	دستگاه تحت تعمیر
S_1	m	0
S_2	m-1	1
S_3	m-2	2
S_m	1	m-1
S_{m+1}	0	m

[1] State Space

به منظور مدل‌سازی شرایط مختلف آماده به کار بودن دستگاه‌های حفاری دورانی در این مقاله، ۴ فضای حالت به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

- S_1: هر ۳ دستگاه حفاری در دسترس و آماده به کار
- S_2: ۲ دستگاه حفاری آماده به کار و ۱ دستگاه تحت تعمیر
- S_3: ۱ دستگاه حفاری آماده به کار و ۲ دستگاه تحت تعمیر
- S_4: هر ۳ دستگاه حفاری تحت تعمیر

نحوه ارتباط و تبدیل فضاهای حالت به یکدیگر برای این شرایط در شکل ۳ آورده شده است.

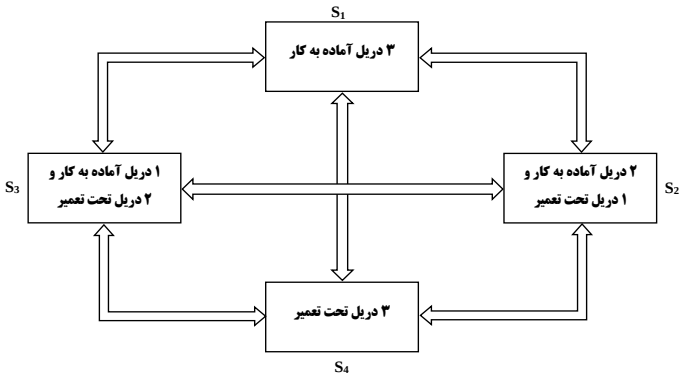
فضاهای حالت توضیح داده شده، تشکیل زنجیره مارکوفی می‌دهند و از این رو برای تعیین قابلیت اطمینان با استفاده از روش فرآیندهای تصادفی و زنجیره مارکوف به مقدار احتمال تغییر یک حالت به حالت دیگر نیاز است. در این مقاله، احتمالات تبدیل فضاها به یکدیگر توسط دو احتمال از کارافتادگی یا توقف و احتمال تعمیر تعریف می‌شوند. به این منظور، آمار از کارافتادگی‌های دستگاه‌های حفاری مورد مطالعه در مدت ۵ سال مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از آن‌ها پایگاه داده‌ای به وجود آمده است. در این بین از کارافتادگی‌هایی که در طول ۵ سال فقط یک مرتبه و فقط برای یک دستگاه و با مدت زمان بیش از یک ماه رخ داده بوده صرف نظر شده است؛ چرا که می‌توان استدلال کرد، این نوع از کارافتادگی‌ها تنها در شرایط خاص حاصل می‌شود؛ بنابراین می‌توان آن‌ها را اصطلاحاً از کارافتادگی یا توقف‌های استثنایی نامید. از این رو با توجه به نیاز ساخت یک پایگاه داده همگون، از این موارد صرف نظر شده است.

با استفاده از پایگاه داده‌ای بزرگ ایجاد شده، مقدار متوسط برای از کارافتادگی و تعمیر برای هر دستگاه به تفکیک تعیین شده است و سپس این مقادیر برای یک سال محاسبه شده است. در شکل‌های ۴ و ۵، مقدار متوسط از کارافتادگی سالانه و زمان تعمیر سالانه برای ۳ دستگاه و مقدار میانگین آن‌ها به تفکیک نوع از کارافتادگی یا توقف (الکتریکی، حفاری، هوا، هیدرولیک، سرویس و سایر) برحسب روز آورده شده است.

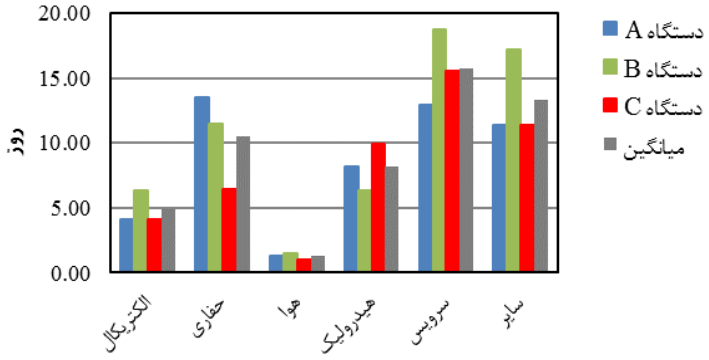
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی معدن سنگ آهن گل‌گهر

شکل ۲- نمایی از دستگاه‌های حفاری مورد مطالعه

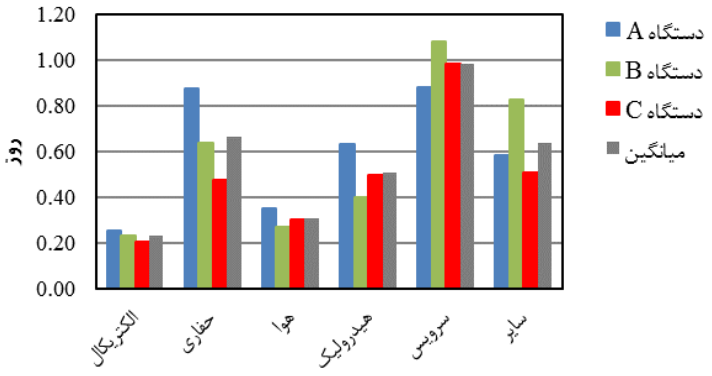
بر این اساس، متوسط از کارافتادگی سالانه برابر با ۵۳/۸۲ روز و متوسط زمان تعمیر، ۰/۵۵ روز بوده است. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، تمام شرایط دستگاه‌ها یکسان بوده است و از این رو برای هر ۳ دستگاه احتمال از کارافتادگی و تعمیر یکسان خواهد بود؛ بنابراین مقدار احتمال از کارافتادگی با منظور کردن ۳۶۳ روز کاری برابر با ۰/۱۴۸ و مکمل آن ۰/۸۵۲ خواهد بود. با همین استدلال، احتمال تعمیر برابر با ۰/۰۰۶ و مکمل آن برابر با ۰/۹۹۴ خواهد بود.



شکل ۳- فضاهای حالت در نظر گرفته‌شده و نحوه ارتباط و تبدیل به یکدیگر



شکل ۴- نمودار متوسط از کارافتادگی سالانه



شکل ۵- نمودار متوسط زمان تعمیر

۵- ارزیابی قابلیت اطمینان

حالت‌های توضیح داده شده S_1 تا S_4 زنجیره مارکوفی تشکیل داده، با استفاده از احتمالات تبدیل هر یک از حالات به یکدیگر می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه کرد.

با توجه به شرایط مسئله از آنجایی که در هر انتقال از یک مرحله به مرحله دیگر باید بین تعدادی دستگاه، یک تعداد مشخص انتخاب شود، می‌توان از توزیع دوجمله‌ای برای محاسبه مقادیر احتمال گذار سیستم از یک حالت به حالت دیگر استفاده کرد [۱۲]. تابع چگالی احتمال این توزیع برای متغیر تصادفی X به‌صورت زیر است:

$$p(k)=\Pr(X=k)=\binom{n}{k}p^{k}(1-p)^{n-k}$$

$$for \quad k=1,2,...,n \qquad (۲)$$

این رابطه در حقیقت احتمال اینکه از میان n آزمایش برنولی، k موفقیت حاصل شود را محاسبه می‌کند. در این رابطه، p احتمال موفقیت و (1-p) احتمال عدم موفقیت یا شکست است که مکمل احتمال موفقیت است. برای روشن شدن چگونگی محاسبه احتمال‌ها در ماتریس انتقال در این مقاله، نحوه محاسبه p_{23} (احتمال انتقال از فضای حالت دوم به سوم) شرح داده می‌شود.

در فضای حالت S_2، تعداد ۲ دستگاه حفاری آماده به کار و ۱ دستگاه حفاری تحت تعمیر و در فضای حالت S_3، ۱ دستگاه حفاری آماده به کار و ۲ دستگاه حفاری تحت تعمیر است. به دو صورت می‌توان از حالت S_2 به حالت S_3 گذار کرد:

نوع گذار اول: تحت تعمیر باقی ماندن ۱ دستگاه حفاری تحت تعمیر و تحت تعمیر قرار گرفتن ۱ دستگاه حفاری از ۲ دستگاه حفاری آماده به کار

نوع گذار دوم: رویداد اول: آماده به کار شدن ۱ دستگاه حفاری تحت تعمیر و تحت تعمیر قرار گرفتن ۲ دستگاه حفاری آماده به کار

در شکل ۶، چگونگی این انتقال نمایش داده شده است.

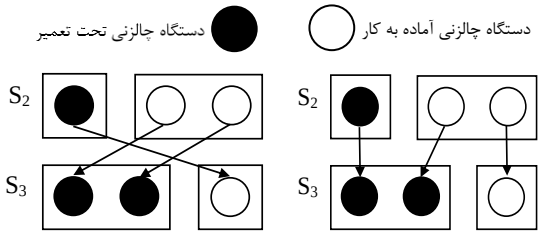
برای گذار نوع اول با استفاده از توزیع دوجمله‌ای خواهیم داشت:

$$\binom{1}{1}\left(\frac{0.55}{363}\right)^{1}\times\left(\frac{362.45}{363}\right)^{0}\times$$
$$\binom{2}{1}\left(\frac{53.82}{363}\right)^{1}\times\left(\frac{309.18}{363}\right)^{1}=3.8267\times10^{-4}$$

همچنین برای گذار نوع دوم به دست خواهد آمد:

$$\binom{1}{1}\left(\frac{362.45}{363}\right)^{1}\times\left(\frac{0.55}{363}\right)^{0}\times$$
$$\binom{2}{2}\left(\frac{53.82}{363}\right)^{2}\times\left(\frac{309.18}{363}\right)^{0}=0.0219$$

و از آنجایی‌که گذار نوع اول یا دوم رخ خواهد داد، احتمال کل برابر با جمع احتمال هریک از این دو نوع گذار خواهد شد.



شکل ۶- حالات گذار حالت S_2 به S_3

به روش و با استدلال‌هایی مشابه، درایه‌های ماتریس انتقال به‌صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$P=\begin{bmatrix}0.6179 & 0.3227 & 0.0562 & 0.0032\\ 0.7244 & 0.2533 & 0.0223 & 0\\ 0.8491 & 0.1504 & 0.0005 & 0\\ 0.9955 & 0.0045 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

برای تعیین توزیع ماندار این زنجیره مارکوف، ماتریس انتقال به توان‌های بالاتر رسیده تا جایی‌که بردار ثابت آن حاصل شود. در این مقاله، با به توان ۶ رسیدن ماتریس انتقال، توزیع ماندار زنجیره مارکوف به صورت ماتریس F حاصل شده است:

$$F=\begin{bmatrix}0.6601 & 0.2941 & 0.0437 & 0.0021\\ 0.6601 & 0.2941 & 0.0437 & 0.0021\\ 0.6601 & 0.2941 & 0.0437 & 0.0021\\ 0.6601 & 0.2941 & 0.0437 & 0.0021\end{bmatrix}$$

همان طور که قبلاً هم بیان شد، راه دیگر برای یافتن بردار احتمال ماتریس انتقال و تعیین توزیع ماندار، استفاده از رابطه (۱) است. در این مقاله، بردار t با توجه به وجود ۴ فضای حالت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t=[\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4]$$

برای پیدا کردن مقادیر α_i، باید این بردار طبق رابطه (۱) در ماتریس P ضرب شود. از این طریق، ۴ رابطه حاصل می‌شود که به آن‌ها باید رابطه‌ای را که نشان دهنده برابر با ۱

شدن مجموع α_iها است نیز اضافه کرد. بر این اساس برای تعیین بردار t دستگاه معادلات زیر باید حل شود:

$$\begin{cases} 0.6179\alpha_1 + 0.7244\alpha_2 + 0.8492\alpha_3 + 0.9955\alpha_4 = \alpha_1 \\ 0.3227\alpha_1 + 0.2533\alpha_2 + 0.1504\alpha_3 + 0.0045\alpha_4 = \alpha_2 \\ 0.0562\alpha_1 + 0.0223\alpha_2 + 0.0005\alpha_3 = \alpha_3 \\ 0.0033\alpha_1 = \alpha_4 \\ \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1 \end{cases}$$

با حل دستگاه معادلات بالا مقادیر بردار t به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\alpha_1 = 0.6601 \quad \alpha_2 = 0.2941 \quad \alpha_3 = 0.0437 \quad \alpha_4 = 0.0021$$

بر اساس، نتایج به دست آمده در جدول ۲ هریک از فضاهای حالت همراه با قابلیت اطمینان آن و تعداد روز کاری متناظر، آورده شده است.

جدول ۲- نتایج به‌دست‌آمده برای قابلیت اطمینان سیستم در هریک از حالت‌های تعریف‌شده

فضای حالت	حالت: تعداد دستگاه آماده‌به‌کار	حالت: تعداد دستگاه تحت تعمیر	احتمال	تعداد روز متناظر (از ۳۶۳ روز کاری)
S_1	۳	۰	۰/۶۶۰۱	۲۴۰
S_2	۲	۱	۰/۲۹۴۱	۱۰۷
S_3	۱	۲	۰/۰۴۳۷	۱۶
S_4	۰	۳	۰/۰۰۲۱	۱

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود که با احتمال ۹۵/۴۲ ٪ که متناظر با ۳۴۷ روز کاری است، حداقل ۲ دستگاه حفاری در دسترس و آماده‌به‌کار هستند.

۶- اعتبارسنجی

به منظور اعتبار سنجی نتایج به دست آمده، برای هرسال از بازه ۵ ساله مورد بررسی، با استفاده از داده‌های خرابی تعداد روزهای برقرار بودن هریک از فضاهای حالت تعریفی محاسبه شده، با نتایج مورد مقایسه قرار گرفته است. بر این اساس برای این دوره ۵ ساله به طور متوسط نتایج تحلیل به دست آمده دارای ۲ روز اختلاف با مقادیر واقعی است. این اختلاف ناچیز، نشان‌دهنده قدرت محاسباتی و تحلیلی این روش است.

۷- نتیجه‌گیری

اطمینان از عملکرد و در دسترس بودن ماشین‌آلات در معادن روباز به دلیل حجم زیاد تولید و ریسک بالای سرمایه‌گذاری، دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این بین، اطلاع از قابلیت اطمینان دستگاه‌های حفاری به دلیل بزرگ مقیاس بودن و ایفای نقش در اولین مرحله از مراحل تولید ماده معدنی امری ضروری است. به‌منظور برآورد قابلیت اطمینان از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. در پژوهش حاضر، با مدنظر قرار دادن دستگاه‌های حفاری دورانی معدن شماره ۱ از مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان و استفاده از نظریه فرآیندهای تصادفی و روش زنجیره‌های مارکوفی، قابلیت اطمینان این دستگاه‌ها محاسبه شده است. برای این منظور، با استفاده از اطلاعات از کارافتادگی دستگاه‌ها در مدت ۵ سال احتمال، از کارافتادگی و تعمیر دستگاه‌ها برآورد شده است. سپس با تعریف ۴ ترکیب مختلف برای تعداد دستگاه-های آماده به کار و تحت تعمیر، احتمال هریک از ترکیب‌ها به دست آمده است. بر این اساس با در نظر گرفتن ۳۶۳ روز کاری در معدن، فاصله اطمینان ۹۵/۴۲ ٪ مطابق با ۳۴۷ برای آماده‌به‌کار بودن حداقل ۲ دستگاه حاصل می‌شود. این مقدار از قابلیت اطمینان به در دسترس بودن ۲ دستگاه با توجه به حجم عملیاتی در معدن، مقداری مطلوب ارزیابی می‌شود.

۸- مراجع

[۱] محقر ع، حسینی م، بهرامی ح (۱۳۹۴) بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان تجهیزات شبکه‌ی انتقال برق از طریق بهینه‌سازی زمان‌بندی سرویس تعمیر و نگه‌داری با استفاده از الگوریتم مورچگان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی صنایع و مدیریت شریف ۳۶-۲۹ :(۱)۳۱-۱.

[۲] حسینی س‌هـ (۱۳۹۰) مدل‌سازی و شبیه‌سازی قابلیت اطمینان درام شیرر در معادن جبهه‌کار طولانی مکانیزه- مطالعه موردی: معدن زغال‌سنگ طبس. رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[3] Levkovich PE, Chalenko NE (1969) Use of reliability theory to calculate the required number of reserve longwall faces. J Min Sci+ 5(2): 160-165.

[4] Samanta B, Sarkar B, Mukherjee S (2004) Reliability modelling and performance analyses of

an LHD system in mining. J S Afr I Min Metall 104(1): 1-8.

[5] Barabady J (2005) Reliability and maintainability analysis of crushing plants in Jajarm Bauxite Mine of Iran. Paper presented at the Reliability and Maintainability Symposium. Proceedings, Annual.

[6] Gupta S, Ramkrishna N, Bhattacharya J (2006) Replacement and maintenance analysis of longwall shearer using fault tree technique. Min Technol 115(2): 49-58.

[7] Gupta S, Bhattacharya J (2007) Reliability analysis of a conveyor system using hybrid data. Qual Reliab Eng Int 23(7): 867-882.

[8] Yang D, Li J, Ran L (2008) Research on reliability of complex coal mine ventilation networks. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM'08. 4th International Conference on.

[9] Sharma G, Haukaas T, Hall R A, Priyadarshini S (2009) Bayesian statistics and production reliability assessments for mining operations. Int J Min Reclam Environ 23(3): 180-205.

[10] Uzgoren N, Uysal O, Elevli S, Elevli B (2010) Reliability analysis of draglines'mechanical failures. Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability (4): 23-28.

[11] Kumar Behera D, Sarkar A, Behera A (2011) Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a mine. IJARCSMS 11(2): 186-194.

[12] Jalali S, Forouhandeh S (2011) Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction. Safety Sci 49(5): 664-669.

[13] Wijaya A R, Lundberg J, Kumar U (2012) Downtime analysis of a scaling machine. Int J Min Reclam Environ 26(3): 244-260.

[14] Gustafson A (2013) Automation of Load Haul Dump machines comparative performance analysis and maintenance modeling. PhD Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.

[15] Moniri Morad A, Pourgol-Mohammad M, Sattarvand J (2014) Application of reliability-centered maintenance for productivity improvement of open pit mining equipment: Case study of Sungun Copper Mine. J Cent South Univ T 21(6): 2372-2382.

[16] Mouli C, Chamarthi S, Gá R C, Vá A K (2014) Reliability modeling and performance analysis of dumper systems in mining by KME method. IJCET (2): 255-258.

[۱۷] مرشدلو ع، دهقانی ح، بهرامی ح (۱۳۹۴) تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه ناوزنجیری زرهی در معدن زغالسنگ مکانیزه طبس. نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن ۹-۱ :(۲۶)۱۰.

[۱۸] منیری‌مراد الف، ستاروند ج، بهرامی ح (۱۳۹۴) بهینه‌سازی تخصیص قابلیت اطمینان برای سیستم تولید معدن روباز با استفاده از الگوریتم ژنتیک. سومین کنفرانس معادن روباز ایران، کرمان، دانشگاه شهید باهنر.

[۱۹] رضایی ز، جلالی س‌م‌الف، سرشکی ف (۱۳۹۱) بررسی اثر حرکت لوکوموتیو معدنی بر قابلیت اعتماد شبکه-های تهویه معادن زیرزمینی (مطالعه موردی: معدن زغال تخت). نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن ۱۳-۱ : (۱۴)۷.

[20] Birolini A (2007) Reliability engineering. 5th edn. Springer, New York.

[21] Wang H, Pham H (2006) Reliability and optimal maintenance. Springer, New York.

[۲۲] بیلینتون ر، آلن ر (۱۳۹۰) قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی. ترجمه: محسن رضاییان، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ دوم.

[23] Papoulis A (2002) Probability, random variables and stochastic. McGraw-Hill, Europe.

[۲۴] جلالی س‌م‌الف، حسینی س‌م‌ع، نجفی م (۱۳۸۸) برآورد تعداد کارگاه‌های استخراج ذخیره در معدنکاری زیرزمینی با استفاده از فرآیندهای تصادفی. نشریه علمی پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۵۲-۴۵ :۷۲.

[25] Jalali SME, Hoseinie SA, Najafi M, Ameri M (2008) Prediction of confidence interval for the availability of the reserve stops in the underground mining using markov chains. In: 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Lulea, Sweden, 285-290.

[۲۶] عطایی م (۱۳۷۷) طرح پژوهشی تعیین مدل توزیع عیار در آنومالی شماره ۳ معدن سنگ آهن گل‌گهر. شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان.