

## بررسی اثر حرکت لوکوموتیو معدنی بر قابلیت اعتماد شبکه‌های تهویه معادن زیرزمینی (مطالعه موردی: معدن زغال تخت)

زهره رضایی<sup>۱</sup>، سیدمحمداسماعیل جلالی<sup>۲\*</sup>، فرهنگ سرشکی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر zrezaei@aut.ac.ir  
۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود jalalime@shahroodut.ac.ir  
۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود farhang@shahroodut.ac.ir

(دریافت ۲۱ شهریور ۱۳۸۹، پذیرش ۲۹ خرداد ۱۳۹۰)

### چکیده

شبکه تهویه طراحی شده در معادن زیرزمینی ممکن است تحت تأثیر عواملی نظیر قرار گرفتن اجسام در مسیر عبور هوا و خرابی سیستم‌های نگهداری دچار افت فشار، ناپایداری و تغییرات شدت جریان هوا شود. در این شرایط عملکرد مطلوب شاخه که مقدار آن با توجه به شدت جریان طراحی شده تعریف می‌شود، تغییر می‌کند. به‌طور طبیعی برای بیان سطح عملکرد مورد انتظار یک شاخه می‌توان از قابلیت اعتماد استفاده کرد. ملاحظات اقتصادی و ایمنی در یک معدن زیرزمینی ایجاب می‌کند که شبکه تهویه آن به نحوی مؤثر، ایمن و قابل اطمینان بتواند میزان هوای مورد نیاز در نقاط مختلف شبکه را تأمین کند. به نظر می‌رسد محاسبه قابلیت اطمینان اجزای شبکه و در نهایت محاسبه قابلیت اطمینان شبکه بهترین روش برای ارزیابی شبکه باشد. در این مقاله روش جدیدی مبتنی الگوریتم دیکسترا برای محاسبه و تحلیل قابلیت اعتماد شبکه تهویه معرفی شده و با استفاده از تابع توزیع شدت جریان شاخه‌ها، ناشی از حرکت لوکوموتیو معدنی در تونل‌های باربری، قابلیت اعتماد هر شاخه از شبکه تعریف شده است. در نهایت قابلیت اعتماد کل شبکه محاسبه شده است. در این مقاله روش پیشنهاد شده بر روی شبکه تهویه معدن زغال سنگ تخت اجرا شده است. شبکه زغال سنگ تخت شامل ۵ کارگاه استخراج، ۳ کارگاه بین ترازهای ۷۶۶+ و سطح زمین، ۲ کارگاه بین ترازهای ۷۶۶+ و ۷۲۲+ است. عملیات باربری در ۲ تونل دنباله‌رو لایه توسط لوکوموتیو انجام می‌شود. بر اساس حالت‌های مختلف حضور لوکوموتیو در هر یک از بخش‌های مسیر باربری ۴۴ حالت مختلف شبیه‌سازی شده است و تأثیر حضور لوکوموتیو بر تغییرات شدت جریان محاسبه شده است؛ بنابراین قابلیت اعتماد شبکه تهویه بین گره‌های ورودی و خروجی برابر با ۳۰٪ خواهد بود.

### کلمات کلیدی

معدنکاری زیرزمینی، تهویه، قابلیت اعتماد، شاخه، شبکه

## ۱- مقدمه

از کار افتادن و خرابی سیستم‌ها یا تجهیزات موجب وقوع اختلال در سطوح مختلف شده و تهدیدی جدی برای بهره‌برداران آن‌ها است. از این رو بهره‌برداران و به‌طور کلی مردم جامعه انتظار دارند که محصولات و سیستم‌های مورد استفاده آن‌ها پایا، اطمینان بخش و ایمن باشند. بنابراین همواره این مسأله مطرح است که قابلیت اعتماد و ایمنی سیستم در طول مدت بهره‌برداری از آن چقدر است؟

قابلیت اعتماد یک شاخص مهندسی برای ارزیابی اطمینان از عملکرد مناسب سیستم‌های مختلف مهندسی است. این شاخص تا کنون به طور بسیار گسترده‌ای در تمامی شاخه‌های علمی و فنی از جمله مهندسی هوافضا، مهندسی تسلیحات نظامی، مهندسی مخابرات، نیروگاه‌های اتمی و شبکه‌های جریان از جمله شبکه‌های حمل و نقل و شبکه‌های انتقال برق استفاده شده است.

شبکه تهویه در معادن زیرزمینی نیز می‌تواند با روش‌های مشابه آنچه که برای تعیین قابلیت اعتماد دیگر شبکه‌های جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد، تحلیل شود.

شبکه تهویه ممکن است تحت تأثیر عواملی نظیر قرار گرفتن اجسام در مسیر عبور هوا، کاهش سطح مقطع کارهای معدنی و خرابی سیستم‌های نگهداری دچار افت فشار و ناپایداری جریان هوا شود. با توجه به لزوم حفظ عملکرد شبکه تهویه معدن در یک سطح مطلوب، لازم است قابلیت اعتماد شبکه در شرایط عدم قطعیت بررسی شود. به عبارت دیگر شبکه‌ای در معرض آسیب باید به نحوی طراحی و یا بازسازی شود که در صورت بروز یک آسیب خاص، عملکرد مناسبی داشته باشد و بتواند معیار عملکرد مورد نظر را با قابلیت اعتماد مطلوب طراحان یا بهره‌برداران برآورده سازد.

به هر حال، ملاحظات اقتصادی و ایمنی در یک معدن زیرزمینی ایجاب می‌کند که شبکه تهویه آن به نحوی مؤثر، ایمن و قابل اعتماد بتواند میزان هوای مورد نیاز در نقاط مختلف شبکه را تأمین کند. برای طراحی یا ارزیابی یک شبکه تهویه در راستای دستیابی به اهداف مورد نظر از شبکه، طراحان نیازمند معیارها و ابزارهای عملی هستند که از آن طریق بتوانند به شبکه‌ای با عملکرد مناسب دست یابند. در حال حاضر روش معینی برای ارزیابی عملکرد شبکه تهویه وجود ندارد. به نظر می‌رسد محاسبه قابلیت اعتماد اجزای شبکه و در نهایت محاسبه قابلیت اعتماد شبکه، بهترین روش

برای دستیابی به این هدف باشد.

بنابراین در تحلیل شبکه‌های تهویه ابتدا لازم است قابلیت اعتماد هر شاخه و سپس قابلیت اعتماد شبکه تعریف شود. در این تحقیق ابتدا قابلیت اعتماد به اجزای شبکه یعنی شاخه‌ها که هر یک مشخص کننده یک کار معدنی است، تعریف می‌شود سپس قابلیت اعتماد کل شبکه با کاربرد یک روش ابتکاری محاسبه می‌شود.

قرار گرفتن سیستم‌های حمل و نقل و یا کارکنان معدنی در مسیر عبور هوا، وقوع ریزش‌ها یا تخریب سیستم‌های نگهداری سبب افزایش مقاومت شاخه و در نتیجه کاهش شدت جریان آن می‌شوند. بر این اساس، در این مقاله قابلیت اعتماد یک شاخه متناسب با افزایش مقاومت آن شاخه و کاهش شدت جریان نسبت به شدت جریان طراحی شده در هر شاخه تعریف شده است.

## ۲- تعاریف

تعریف قابل قبولی که از قابلیت اعتماد به طور عمومی مورد استفاده قرار گرفته، عبارت است از توانایی یک بخش (برای مثال یک سیستم تولید) برای انجام دادن عملیاتی در دوره زمانی از پیش تعیین شده و یا یک چرخه که به آن بخش تخصیص داده شده است [۱].

بر این اساس در این مقاله شاخص‌های قابلیت اعتماد در شبکه معدنی تعریف شده است.

## ۲-۱- شاخص‌های قابلیت اعتماد در شبکه تهویه

در طراحی سیستم‌های تهویه معدن زغال‌سنگ، شدت جریان هر شاخه با توجه به کاربری آن شاخه تعیین می‌شود. به‌طور عمده حجم هوا بر اساس حجم هوای لازم برای ترقیق گاز متصاعد شده در اثر استخراج محاسبه می‌شود. علاوه بر این عوامل دیگری چون ترقیق گاز حاصل از مواد منفجره و گرد و غبار تولید شده، خنک کردن هوای داخل معدن در معادن زغال‌سنگ عمیق در محاسبه شدت جریان هوا دخالت دارند. بر اساس موارد مذکور شدت جریان لازم برای هر شاخه و در نهایت شدت جریان کل مربوط به شبکه محاسبه می‌شود. بنابراین ورودی و خروجی سیستم، شدت جریان محاسبه شده توسط طراح سیستم تهویه است.

شاخص کلاسیک قابلیت اطمینان در هر شاخه، احتمال وقوع از کار افتادگی را تعریف می‌کند. ولی شاخص‌های متعدد دیگری نیز امروزه برای این منظور به کار می‌روند که بستگی به

نوع سیستم و الزامات چگونگی کارکرد آنها دارد. بنابراین قابلیت اعتماد نام عمومی برای بسیاری از این شاخص‌ها است که چند نمونه آن در ادامه ذکر شده است [۲].

۱. انتظار از کار افتادگی بر حسب تعداد وقوع حالات از کار افتادگی در یک محدودی زمانی معین
۲. میانگین زمان بین از کار افتادگی‌ها
۳. زیان مورد انتظار در سرمایه‌گذاری به علت از کار افتادن
۴. کاهش انتظار در خروجی سیستم ناشی از انواع از کار افتادگی‌ها

با این تفصیل، در مورد هر شاخه، شاخص قابلیت اعتماد را می‌توان به صورت کاهش انتظار در خروجی سیستم، ناشی از انواع از کار افتادگی‌ها تعریف کرد. به منظور کاربرد این تعریف برای سیستم‌های تهویه هر یک از شاخه‌های شبکه یک سیستم مجزا در نظر گرفته می‌شود و قابلیت اعتماد شاخه مزبور محاسبه می‌شود. در نهایت این سیستم بزرگ‌تر شده و قابلیت اعتماد هر شاخه به کل شبکه تعمیم داده می‌شود. با استفاده از این تعریف می‌توان برای شدت جریان خروجی از هر سیستم رده‌بندی مناسبی با توجه به کاربرد شاخه مورد بررسی، ارائه داد. از طریق این تعریف حد مجاز تغییرات و قابلیت اعتماد این سیستم در نتیجه تغییرات شدت جریان قابل محاسبه است.

#### ۲-۴ معیار عملکرد رضایت‌بخش در هر شاخه

تعیین معیار عملکرد رضایت‌بخش، به قضاوت‌های مهندسی و انتظارات بهره‌برداران از یک سیستم بستگی دارد. از کارافتادگی در یک سیستم ممکن است به شکل‌های مختلف به شرح زیر اتفاق افتد [۳]:

۱. از کار افتادگی فاجعه‌آمیز
  ۲. از کار افتادگی عمده
  ۳. تنزل مشخصات نسبت به یک حدود معین
- در یک سیستم تهویه، ابتدایی‌ترین وظیفه هر شاخه انتقال هوا است. بنابراین برای محاسبه قابلیت اعتماد باید معیار عملکرد رضایت بخش مناسبی معرفی شود و رده بندی‌هایی بر اساس آن معیار به منظور محاسبه قابلیت اعتماد ارائه شود. برای معرفی معیار عملکرد رضایت بخش در هر شاخه، با توجه به کاربری شاخه‌های مختلف، آنها به دو گروه زیر تقسیم‌بندی شده‌اند.

گروه اول در برگیرنده شاخه‌هایی است که تنها به عنوان واسطه عبور هوا (نه مصرف کننده) در کل شبکه عمل می‌کنند. این شاخه‌ها از اهمیت چندانی ندارند و معیاری که می‌توان بر

اساس آن رده بندی مناسب تهیه کرد، سرعت مجاز عبور هوا در هر یک از شاخه‌ها است. به عنوان مثال در صورتی که سرعت از حدود سقف و کف مجاز تعیین شده فراتر رفته یا کاسته شود، قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد و حتی ممکن است که آن شاخه ناکارآمد شود.

گروه دوم شامل شاخه‌های حاوی کارگاه‌های استخراج یا منابع مصرف کننده تهویه هوا است در این شاخه‌ها معیاری که بر اساس آن رده بندی مناسب تدوین می‌شود تنها سرعت عبور هوا نیست، بلکه از آنجا که این شاخه‌ها، شاخه‌های هدف در فرآیند تهویه هستند برای تک تک عوامل زیر، رده‌بندی‌هایی تدوین و بر حسب اهمیت هر رده، قابلیت اطمینان مربوط به هر شاخه محاسبه می‌شود. این رده‌ها عبارتند از:

۱. شدت جریان لازم برای ترفیق گازهای متصاعد شده از کانسنگ و لایه‌های درونگیر آن (بیشتر در مورد کانسنگ زغال سنگ)
۲. سقف و کف سرعت مجاز عبور هوا
۳. شدت جریان لازم برای ترفیق گازهای حاصل از مصرف مواد منفجره
۴. شدت جریان لازم بر اساس تعداد نفراتی که مشغول به کار هستند

#### ۲-۴ رده بندی تغییرات شدت جریان نسبت به مقادیر

##### پیش‌بینی شده

گاز زغال خطرناک‌ترین گاز در معادن زغال سنگ است. مهمترین خطر گاز زغال انفجار آن است. برای جلوگیری از انفجار گاز زغال باید با انجام تهویه مناسب، همواره عیار گاز در حد مجاز نگه داشته شود. بنابراین شدت جریان لازم برای ترفیق گاز زغال مهم است و در رده بندی شدت جریان به عنوان پر مخاطره‌ترین عامل در رده قرار می‌گیرد. در محاسبه شبکه‌های تهویه، شدت جریانی معادل  $Q_1$  به عنوان شدت جریان لازم برای ترفیق گازهای متصاعد شده از زغال سنگ معرفی می‌شود. به دلیل این که  $Q_1$  در رده قرار می‌گیرد و تغییرات آن به عنوان پر مخاطره‌ترین عامل در طراحی سیستم‌های تهویه شناخته شده، باید بازه تغییرات آن کوچک باشد. به این صورت که افزایش یا کاهش  $Q_1$  تنها تا ۱۰٪ مجاز خواهد بود. با فراتر رفتن شدت جریان عبوری از مرز تعیین شده، شاخه مورد نظر ناکارآمد خواهد شد [۴].

سرعت هوا در قسمت‌های مختلف معدن نیز یکی دیگر از

شده برای آن شاخه اتفاق می‌افتد. در صورت بروز از کارافتادگی عمده در یک شاخه کل شبکه از کار خواهد افتاد. احتمال از کارافتادگی به صورت کاهش مشخصات از یک حدود معین را می‌توان احتمال بین مرز مجاز و مرز بحرانی برای تغییرات شدت جریان هر شاخه تعریف کرد. در این شرایط، به هنگام بروز از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک حدود معین، شاخه به‌طور کامل ناکارآمد نشده ولی وظیفه خود را به صورت ناقص انجام می‌دهد. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که تابع توزیع نرمال بهترین برازش را برای داده‌های تغییرات شدت جریان در شاخه‌ها دارد. بنابراین از کارافتادگی فاجعه‌آمیز و از کار افتادگی از نوع تنزل مشخصات از یک محدوده معین از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آید.

$$Q_f^{Cr} = P(Q_{max}^{Cr} < Q_i < Q_{min}^{Cr}) = 1 - \int_{Q_{min}^{Cr}}^{Q_{max}^{Cr}} f(q) dq \quad (1)$$

همچنین:

$$Q_f^{All} = P(Q_{max}^{All} < Q_i < Q_{min}^{All}) = 1 - \int_{Q_{min}^{All}}^{Q_{max}^{All}} f(q) dq \quad (2)$$

که در آن:

$Q_f^{Cr}$ : احتمال از کار افتادگی فاجعه‌آمیز

$Q_{min}^{Cr}$ : حداقل شدت جریان بحرانی

$Q_{max}^{Cr}$ : حداکثر شدت جریان بحرانی

$Q_f^{All}$ : احتمال از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک

محدوده معین

$Q_{min}^{All}$ : حداقل شدت جریان مجاز

$Q_{max}^{All}$ : حداکثر شدت جریان مجاز

یک نمونه از کارافتادگی فاجعه‌آمیز و از کارافتادگی به صورت کاهش مشخصات از یک محدوده معین را می‌توان برای یک شاخه به صورت زیر تحلیل کرد. فرض می‌شود شاخه مورد نظر، شاخه ورودی هوا به معدن باشد که در این شاخه مرز بحرانی و مرز مجاز تغییرات شدت جریان بر اساس رده یعنی کمینه و بیشینه سرعت هوا تعیین می‌شود. بنابراین مطابق شکل ۱ مرز بحرانی و مرز مجاز بر اساس تغییرات سرعت در شاخه تعریف می‌شوند. فرض می‌شود میانگین تغییرات شدت جریان در شاخه مزبور ۲۵ متر مکعب بر ثانیه است. سطح

مشخصات مهم در محاسبه شدت جریان تهویه است. سرعت هوا نباید از حدود معینی کمتر یا بیشتر باشد. مقادیر مجاز این سرعت در قسمت‌های مختلف معدن به شرح جدول ۱ است.

با در نظر گرفتن سقف و کف سرعت مجاز عبور هوا در محاسبه شبکه تهویه،  $Q_p$  به‌عنوان شدت جریان مجاز معرفی می‌شود. از آنجا که این عامل در مقایسه با شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای متصاعد شده از زغال، اهمیت کمتری دارد، بازه مجاز تغییرات آن نسبت به رده گسترده‌تر خواهد بود. بر این اساس، افزایش و یا کاهش  $Q_p$  تنها تا ۲۰٪ مجاز خواهد بود.

جدول ۱ مقادیر مجاز سرعت در قسمت‌های مختلف معدن [۵]

سرعت مجاز	شرح
۴	حداکثر سرعت مجاز در قسمت‌های داخلی
۸	حداکثر سرعت مجاز در چاه یا تونل اصلی ورود هوا
۱۰	حداکثر سرعت مجاز در چاه یا تونل اصلی برگشت هوا
۱	حداقل سرعت مجاز در کارگاه استخراج
۰/۲۵	حداقل سرعت مجاز در تونل‌های باربری

ترقیق گازهای حاصل از انفجار نیز یکی دیگر از جنبه‌های ضروری تهویه است. شدت جریان  $Q_p$  که به منظور ترقیق این گازها تا حد مجاز مورد نیاز است، با درجه اهمیت یکسانی نسبت به  $Q_p$  در نظر گرفته شده است. بنابراین بازه تغییرات آن برابر با رده و معادل ۲۰٪ می‌باشد.

شدت جریان هوای لازم برای هر یک از کارکنان معدن، معادل ۶ متر مکعب بر دقیقه در نظر گرفته می‌شود. حتی در شرایط بسیار بد کاری شدت جریان لازم برای تنفس هر یک از کارگران خیلی کمتر از مقدار در نظر گرفته است. بنابراین بازه تغییرات (رده IV) معادل ۴۰٪ و از هر سه رده بزرگتر در نظر گرفته شده است [۶].

#### ۲-۴ قابلیت اعتماد در هر شاخه

از کارافتادگی در هر شاخه از یک سیستم تهویه ممکن است به صورت از کار افتادگی فاجعه‌آمیز و یا کاهش مشخصات از یک حدود معین باشد. از کارافتادگی فاجعه‌آمیز در یک شاخه پس از کاهش یا افزایش شدت جریان از مرز بحرانی تعریف

گاه آن شاخه به صورت مطلوب کار نکند. نقطه ضعف این معیار برای پیاده‌سازی بر روی شبکه‌های تهویه در آن است که بر اساس این معیار، شدت جریان شاخه‌ها در تعیین معیار هیچ نقشی نداشته و نمی‌توان شدت جریان و یا احتمال وقوع حالت‌های ما بین صفر و یک را در ارزیابی قابلیت اعتماد شبکه تهویه دخالت داد. بنابراین برای تحلیل قابلیت اعتماد شبکه تهویه باید روشی به کار برد که در آن اجزای تشکیل دهنده شبکه تهویه در یک سطح اطمینان تعریف شده در ترکیب با هم مشغول به کار باشند. در این مقاله روشی ارایه می‌شود که در آن پس از تعریف قابلیت اعتماد شاخه‌ها، قابلیت اعتماد شبکه با کاربرد الگوریتم دیکسترا به دست می‌آید. برای دستیابی به این هدف چند فرض مد نظر قرار گرفته است:

۱- یک شبکه پاسخگوی نیاز موجود نخواهد بود، هرگاه شدت جریان هر یک از شاخه‌ها از مرز بحرانی تعریف شده برای آن تجاوز کند.

۲- قابلیت اعتماد هر یک از شاخه‌ها، احتمال وقوع حالتی را نشان می‌دهد که در آن شدت جریان هر یک از شاخه‌ها بین مرزهای مجاز تعریف شده باشد.

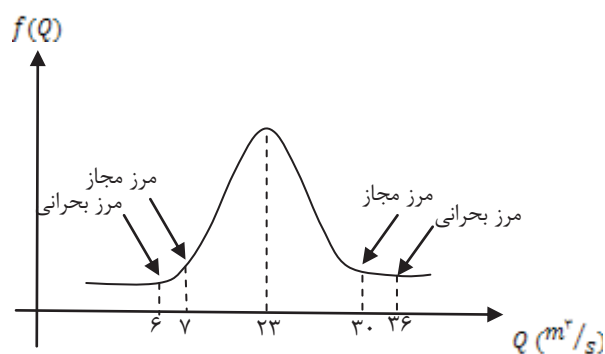
۳- قابلیت اعتماد شبکه‌ای که دارای حداقل یک شاخه با قابلیت اعتماد صفر باشد، صفر است.

برای یافتن قابلیت اعتماد شبکه‌ای که در آن هیچ شاخه‌ای با قابلیت اعتماد صفر وجود ندارد مقدار کمینه‌ی حاصل ضرب قابلیت اعتماد شاخه‌هایی که بر روی هر مسیر محتمل در مسیر ورود تا خروج هوا قرار گرفته است، محاسبه می‌شود. این مسیرهای کمینه با استفاده از الگوریتم دیکسترا شناسایی می‌شود.

### ۳- مدل‌سازی شبکه تهویه معدن تخت

در این اثر حرکت لکوموتیو معدنی بر روی قابلیت اعتماد شبکه تهویه معدن بررسی شده است، بنابراین سعی شده است که مقاومت وضع شده برای محاسبه قابلیت اعتماد بیان شود و سپس حرکت لکوموتیو معدنی در شبکه تهویه مدل‌سازی و قابلیت اعتماد شبکه تحلیل شود. به این منظور شبکه تهویه مربوط به معدن زغال‌سنگ تخت که در شکل ۲ نشان داده شده است مورد بررسی قرار گرفته است.

مقطع مؤثر تونل برای عبور هوا ۵ متر مربع است. بنابراین کمترین شدت جریان مجاز برای شاخه مورد نظر، بر اساس معیار سرعت مجاز و سطح مقطع مؤثر، ۸ متر مکعب بر ثانیه و حداکثر شدت جریان مجاز آن ۳۰ متر مکعب بر ثانیه است. با توجه به این که تغییرات شدت جریان بر اساس مشخصات رده تا ۲۰٪ مجاز است، مرزهای بحرانی، که عبور از آنها سبب از کارافتادگی فاجعه‌آمیز شاخه شده و در نهایت منجر به شکست و از کارافتادگی کل شبکه می‌شود در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: مثالی از کار افتادگی فاجعه‌آمیز و از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک محدوده معین برای یک شاخه

از کار افتادگی فاجعه‌آمیز برای این شاخه برابر است با:

$$Q_f^{Cr} = P(Q > 36) + P(Q < 6)$$

و احتمال از کارافتادگی از نوع کاهش مشخصات از یک محدوده معین برابر با :

$$Q_f^{All} = P(36 > Q > 30) + P(6 < Q < 8)$$

قابل ذکر است که قابلیت اعتماد کل شبکه در حالت از کارافتادگی به صورت کاهش مشخصات از یک محدوده معین محاسبه می‌شود.

### ۲/۵- تحلیل قابلیت اعتماد شبکه تهویه

در تحلیل قابلیت اعتماد شبکه‌های حمل و نقل و انتقال برق، قابلیت اعتماد بیان‌کننده احتمال متصل بودن گره‌های شبکه به یکدیگر است که به آن قابلیت اعتماد پایانه گفته می‌شود [۷]. قابلیت اعتماد پایانه، احتمال وجود حداقل یک مسیر از یک مبدأ خاص به مقصدی معین را تعریف می‌کند. با توجه به این تعریف از قابلیت اعتماد یک شبکه، می‌توان گفت که یک شبکه شامل مجموعه‌ای از شاخه‌ها است که حالت عملکردی هر کدام با یک متغیر صفر و یک تعیین می‌شود. قابلیت اعتماد شاخه یک است هر گاه به طور صحیح کار کند و صفر است هر

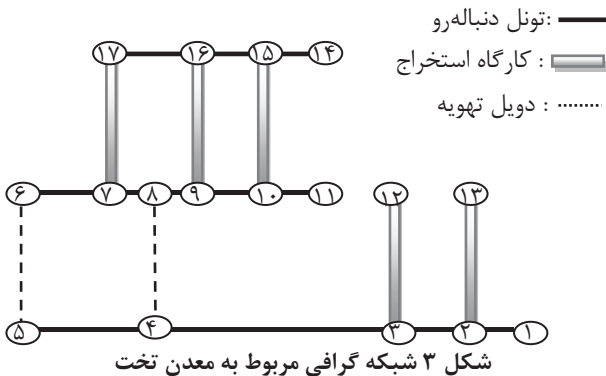
است. سطح مقطع لکوموتیو  $1 \times 1/2$  متر مربع بوده و ضریب مقاومت مانع با توجه به شکل مقطع واگن  $0/8$  است.

### ۳ ۴ مدل سازی شبکه تهویه به صورت یک گراف

در حالت کلی شبکه تهویه معدن از تعدادی کار معدنی که در نقاط مختلف با یکدیگر ارتباط دارند تشکیل شده است. تونل ها و کارهای معدنی در یک شبکه تهویه، شاخه‌هایی هستند که در نقاط گره به یکدیگر متصل شده‌اند.

برای مدل سازی حرکت لکوموتیو معدنی و محاسبه قابلیت اطمینان شبکه تهویه، نخست مدل گرافی معدن تهیه و پس از محاسبه شبکه، مدل سازی مربوط به آن صورت می‌گیرد. در این تحقیق شبکه تهویه مربوط به معدن زغال سنگ تخت مورد بررسی قرار گرفته است.

پهنه‌های استخراج شده و تخریب شده نیازی به هوارسانی ندارند بنابراین از شبکه گرافی معدن حذف شده‌اند. شبکه معدن شامل تونل‌های دنباله‌رو (تونل باربری و تهویه)، دوپل-های تهویه، کارگاه‌های استخراج و پهنه‌های تخریب شده است. به این ترتیب شبکه گرافی مربوط به معدن زغال سنگ تخت مطابق شکل ۳ ایجاد شده است.



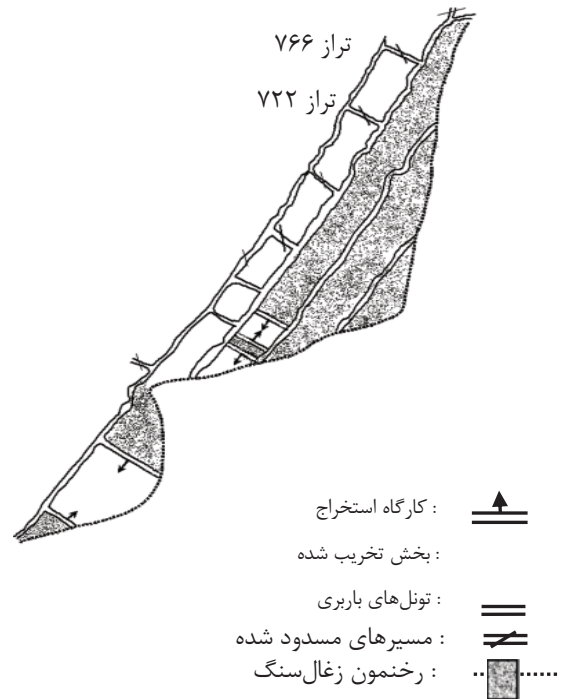
شکل ۳ شبکه گرافی مربوط به معدن تخت

### ۳ ۴ تعیین مشخصات گراف

اغلب گراف‌ها کمیت‌های برداری بوده و دارای جهت و بزرگی (وزن) هستند. جهت جریان هوا در شاخه جهت گراف، و شدت جریان و مقاومت هر شاخه به طور جداگانه بزرگی آن را تشکیل می‌دهند.

مقاومت هر یک از شاخه‌ها مرکب از سه مؤلفه اصلی می‌باشد.

۱. مقاومت ناشی از اصطکاک
  ۲. مقاومت ناشی از وجود موانع در مسیر جریان هوا
  ۳. مقاومت موضعی (محلی)
- مقاومت ناشی از اصطکاک به‌طور عمده در نتیجه اصطکاک ذرات هوا با دیواره کار معدنی تولید می‌شود و مقاومت ناشی از



شکل ۲ شبکه تهویه مربوط به معدن زغال سنگ تخت [۸].

### ۳ ۴ معرفی معدن زغال سنگ تخت

منطقه تخت در ۱۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مینودشت واقع شده است. عملیات آماده‌سازی و دسترسی در این معدن با احداث چهار تونل اصلی با شماره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ انجام شده است. فاصله تونل‌ها در جهت شیب به‌طور تقریبی ۸۰ متر است. این معدن به روش پلکانی معکوس استخراج می‌شود. سیستم حمل و نقل در کارگاه‌های استخراج معدن تخت، ناو ثابت و در تونل‌های اصلی سیستم ریل و واگن است. سیستم نگهداری در کارگاه‌های استخراج نگهداری چوبی بوده و در تونل‌های اصلی قاب فولادی نصب شده است. استخراج در کارگاه‌های معدن توسط پیکور انجام می‌شود و میزان تولید زغال سنگ در معدن حدوداً ۵۰۰۰ تن در ماه است. شبکه معدن زغال سنگ تخت مطابق شکل ۲، شامل ۵ کارگاه استخراج، ۳ کارگاه بین تراز ۷۶۶+ و سطح زمین و ۲ کارگاه بین ترازهای ۷۶۶+ و ۷۲۲+ است.

معدن در ۳ شیفت متوالی کار می‌کند. در ۲ شیفت اول عملیات استخراجی در کارگاه‌ها صورت می‌گیرد. انتقال مواد معدنی استخراج شده طی سیکل باربری توسط ۱۲ واگن در یک شیفت انجام می‌شود. بر اساس مشاهدات انجام شده و اطلاعات موجود ظرفیت وزنی هر واگن  $1/3$  تن، سرعت آن  $1/7$  متر بر ثانیه و زمان بارگیری و تخلیه به ترتیب ۲ و ۱ دقیقه

که لکوموتیو معدنی در آن واقع است و در نتیجه شدت جریان سایر شاخه‌ها و کل شبکه دارد. بنابراین به ازای حرکت لکوموتیو معدنی در هر بخش از تونل برای هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه شدت جریان جدیدی تولید خواهد شد (جدول ۵). این افت از رابطه (۳) قابل محاسبه است [۹].

#### ۴ مدل‌سازی احتمالی حرکت لکوموتیوهای معدنی

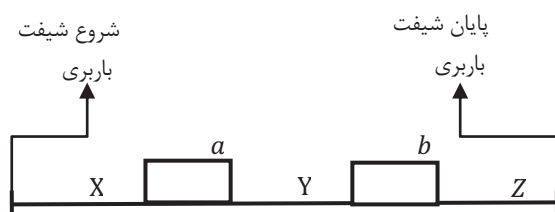
مدل احتمالی حرکت لکوموتیوهای معدنی باید با استفاده از تابع توزیع توأم ایجاد شود. تابع توزیع توأم به وضعیتی اشاره دارد که یک یا چند متغیر تصادفی به طور هم زمان روی یک فضای نمونه‌ای توأم تعریف شده باشد. این بحث را می‌توان برای حالت‌های چند متغیره حتی تعداد نامتناهی از متغیرهای تصادفی تعمیم داد. یک تابع دو متغیره با مقادیر  $f(x, y)$  که روی صفحه  $xy$  تعریف شده است، تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای تصادفی  $x$  و  $y$  خوانده می‌شود؛ اگر و فقط اگر برای هر ناحیه  $A$  از صفحه  $xy$  شرایط زیر برقرار باشد [۱۰].

$$P[(x, y) \in A] = \int \int_A f(x, y) dx dy \quad (۴)$$

تابع دو متغیره را می‌توان به عنوان تابع چگالی احتمال توأم یک جفت متغیر تصادفی پیوسته  $x$  و  $y$  به کار برد در صورتی که مقادیر آن  $f(x, y)$  در شرایط زیر صدق کند.

$$f(x, y) \geq 0, -\infty < y < +\infty, -\infty < x < +\infty, \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dx dy = 1 \quad (۵)$$

تابع توزیع توأم مربوط به زمان‌های شروع و استراحت برای هر دو لکوموتیو معدنی در دو تونل در شیفت باربری به صورت شکل ۴ معرفی شده است.



که در آن:

X: زمان شروع سیکل اول

Y: زمان توقف بین سیکل اول و دوم

Z: زمان توقف بین سیکل دوم و پایان شیفت

$\alpha$ : بازه زمانی سیکل اول

وجود موانع در مسیر جریان هوا در اثر برخورد هوای در حال حرکت به موانع احتمالی حاصل می‌شود. این موانع ممکن است واگن‌های ویژه حمل مواد معدنی یا افراد، مواد حاصل از تخریب تونل و غیره باشد. در اثر این برخورد مقداری از انرژی مفید آن صرف از بین بردن مقاومت مانع مزبور می‌شود و این امر، در جریان هوا اغتشاش به وجود می‌آورد. علاوه بر مقاومت‌های اشاره شده در بالا، هوا هنگام عبور از موانع مخصوص دیگری نیز دچار افت می‌شود و مقداری از انرژی فشاری خویش را از دست می‌دهد. از جمله این موانع پیچ‌خم‌ها، انشعاب‌ها، درهای تهویه و محل‌های گشاد شدن و یا تنگ شدن سطح کارهای معدنی است. به هر حال حرکت لکوموتیو معدنی در طول تونل‌های باربری باعث به وجود آمدن مقاومتی از جنس مقاومت ناشی از موانع خواهد شد.

#### ۳ تحلیل شبکه تهویه معدن تخت

مشخصات هر یک از کارهای معدنی و شدت جریان عبوری از هر یک از شاخه‌های معدن در شرایط عادی (عدم حضور قطار) بر اساس اطلاعات دریافت شده از شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی در جدول ۲ آورده شده است. همانگونه که در بخش ۳-۳ بیان شد، مقاومت ناشی از اصطکاک به‌طور عمده در نتیجه اصطکاک ذرات هوا با دیواره کار معدنی تولید می‌شود. بسته به نوع سیستم نگهداری استفاده شده برای هر یک از بخش‌های

$$R_m = \frac{c\gamma}{2g} \frac{s_m}{(s - s_m)^3} \quad (۳)$$

که در آن:

C: مقاومت آئرودینامیک (۰/۸)

: وزن مخصوص هوای استاندارد (کیلوگرم بر متر مکعب)

: شتاب گرانشی (متر بر مجذور ثانیه)

: سطح مقطع کار معدنی (متر مربع)

$s_m$ : سطح مقطع مؤثر (متر مربع)

شبکه ضریب اصطکاک متفاوت خواهد بود. ضرایب اصطکاک مربوط به بخش‌های مختلف شبکه معدن زغال‌سنگ تخت در جدول ۳ آورده شده است. پیچ و خم‌ها و تنگ و گشاد شدگی‌ها در طول مسیر مقاومتی از جنس مقاومت ناشی از موانع تولید می‌کند. مقاومت فوق در این تحقیق ۲۰٪ مقاومت اصطکاک در نظر گرفته شده است. حرکت لکوموتیو معدنی در تونل نیز مقاومتی از جنس مقاومت ناشی از موانع اعمال می‌کند. افزایش مقاومت تأثیر مستقیم بر شدت جریان شاخه‌ای

متغير تصادفى يکنواخت پيوسته ناميده مى شود، اگر و فقط اگر چگالى احتمال آن به صورت رابطه (۶) باشد [۱۰].

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta - \alpha} & \alpha < x < \beta \\ 0 & \text{ساير نقاط} \end{cases} \quad (۶)$$

$\beta$ : بازه زمانى سيكل دوم

T: زمان توقف کار

در اين شرايط:

$$X + a + Y + b + Z = \epsilon - (\text{زمان تخليه})$$

$$T = X + Y + Z = \epsilon - a - b - (\text{زمان تخليه})$$

در صورت اطلاع از مقادير X و Y مى توان مقدار Z را بدست آورد. بنا بر اين Z ماهيت تصادفى نداشته و مى توان آن را از مسأله خارج کرد. متغير تصادفى داراى چگالى يکنواخت است و

شکل ۴ بازه زمانى مربوط به حرکت لوکوموتيو معدنى در تونل يك

جدول ۲: مشخصات شبکه تهويه رغال سنگ تخت

شماره کار معدنى	گره آغازين	گره انتهايى	نوع کار معدنى	طول (متر)	پيرامون (متر)	سطح مقطع (متر مربع)	ضريب اصطكاك ( )
۱	۱۱	۱۰	تونل	۸۳	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۲	۲	۱۳	کارگاه	۸۳	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵
۳	۷	۱۷	کارگاه	۸۷	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵
۴	۹	۱۶	کارگاه	۸۷	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵
۵	۱۰	۱۵	کارگاه	۸۷	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵
۶	۳	۱۲	کارگاه	۸۳	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵
۷	۱۰	۹	تونل	۲۸	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۸	۹	۸	تونل	۳۹	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۹	۸	۷	تونل	۱۱۳	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۱۰	۸	۴	دويل تهويه	۱۳۰	۶	۲/۲	۰/۰۰۳
۱۱	۷	۶	تونل	۳۹	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۱۲	۶	۵	دويل تهويه	۱۳۱	۶	۲/۲	۰/۰۰۳
۱۳	۵	۴	تونل	۱۵۲	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۱۴	۴	۳	تونل	۴۷۵	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۱۵	۳	۲	تونل	۴۰	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۱۶	۲	۱	تونل	۴۷	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۱۷	۱۷	۱۶	تونل	۳۶	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۱۸	۱۶	۱۵	تونل	۲۴	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹
۱۹	۱۵	۱۴	تونل	۱۸	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹

جدول ۳: مقاومت ناشى از اصطكاك و شدت جريان هر يك از شاخه ها

شماره کار معدنى	نوع کار معدنى	شدت جريان (متر مکعب بر ثانيه)	مقاومت تصحيح شده با منظور کردن افتهاى موضعى و موانع (مورگ)
۱	تونل	۲۶	۱۱/۴
۲	کارگاه	۳/۳	۷۹۸/۶
۳	کارگاه	۵	۸۳۵
۴	کارگاه	۵/۳	۸۳۵
۵	کارگاه	۵/۵	۸۳۵
۶	کارگاه	۳/۴	۷۹۸/۶
۷	تونل	۲۰/۵	۳/۸
۸	تونل	۱۵/۲	۵/۳
۹	تونل	۹/۷	۱۵/۴
۱۰	دويل تهويه	۵/۵	۲۳۵/۵
۱۱	تونل	۴/۷	۵/۳
۱۲	دويل تهويه	۴/۷	۲۳۸/۲
۱۳	تونل	۴/۷	۲۱
۱۴	تونل	۱۰/۲	۶۵
۱۵	تونل	۷	۵/۵
۱۶	تونل	۳/۶	۶/۴
۱۷	تونل	۵	۵
۱۸	تونل	۱۰	۳/۳
۱۹	تونل	۱۶	۳



جدول ۴: تغییرات شدت جریان نسبت به احتمال حضور قطار در هر یک از شاخه‌ها

$Q_{15-14}$	$Q_{16-15}$	$Q_{16-17}$	$Q_{2-8}$	$Q_{7-11}$	$Q_{9-16}$	$Q_{10-11}$	$Q_{2-17}$	$Q_{2-17}$	$Q_{10-11}$	$Q_{9-11}$	$Q_{8-9}$	$Q_{7-8}$	$Q_{6-7}$	$Q_{5-6}$	$Q_{2-5}$	$Q_{2-4}$	$Q_{2-3}$	$Q_{1-2}$	شماره شاخه (محل حضور لوکوموتیو معدنی در تونل)
۱۵,۷۸	۱۰,۲۷	۴,۹۸	۵,۵۴	۴,۹۸	۵,۲۹	۵,۵۱	۳,۳۵	۳,۳	۲۶,۰	۲۰,۵	۱۵,۲	۹,۷	۴,۷	۴,۷	۴,۷	۱۰,۲	۶,۹	۳,۶	حضور خارج از تونل
۱۳,۸	۸,۹۸	۴,۳۵	۴,۸۵	۴,۳۵	۴,۶۳	۴,۸۲	۲,۹۳	۲,۸۹	۲۲,۷	۱۷,۹	۱۳,۳	۸,۵	۴,۱	۴,۱	۴,۱	۹	۶,۰	۳,۱	۱۱-۱۰
۱۳,۸۱	۸,۹۸	۴,۳۶	۴,۸۴	۴,۳۶	۴,۶۳	۴,۸۲	۲,۹۴	۲,۹	۲۲,۷	۱۷,۹	۱۳,۳	۸,۵	۴,۱	۴,۱	۴,۱	۹	۶	۳,۱	۱۱-۱۰ ۲-۱
۱۳,۸۴	۹,۰۱	۴,۳۷	۴,۸۱	۴,۳۷	۴,۶۴	۴,۸۳	۲,۹۹	۲,۸۲	۲۲,۷	۱۷,۹	۱۳,۳	۸,۴	۴,۱	۴,۱	۴,۱	۸,۹	۵,۹	۳,۱	۱۱-۱۰ ۳
۱۵,۰۶	۹,۳۶	۴,۵۴	۵,۰۶	۴,۵۴	۴,۸۲	۵,۶۹	۳,۰۶	۳,۰۲	۲۴,۴	۱۸,۷	۱۳,۹	۸,۸	۴,۳	۴,۳	۴,۳	۹,۳	۶,۳	۳,۳	۹-۱۰
۱۵,۰۶	۹,۳۷	۴,۵۴	۵,۰۶	۴,۵۴	۴,۸۳	۵,۶۹	۳,۰۷	۳,۰۳	۲۴,۴	۱۸,۷	۱۳,۹	۸,۸	۴,۳	۴,۳	۴,۳	۹,۳	۶,۳	۳,۳	۲-۱, ۹-۱۰
۱۵,۰۹	۹,۳۹	۴,۵۵	۵,۰۲	۴,۵۵	۴,۸۴	۵,۷	۳,۱۲	۲,۹۴	۲۴,۳	۱۸,۶	۱۳,۸	۸,۸	۴,۲	۴,۲	۴,۳	۹,۳	۶,۱	۳,۳	۳-۲, ۹-۱۰
۱۵,۶۶	۱۰,۰۷	۴,۶۹	۵,۲۳	۴,۶۹	۵,۲۹	۵,۵۹	۳,۱۶	۳,۱۲	۲۵,۳	۱۹,۷	۱۴,۳	۹,۱	۴,۴	۴,۴	۴,۴	۹,۷	۶,۵	۳,۴	۸-۹
۱۵,۶۷	۱۰,۰۸	۴,۶۹	۵,۲۲	۴,۶۹	۵,۲۹	۵,۵۹	۳,۱۷	۳,۱۳	۲۵,۳	۱۹,۷	۱۴,۳	۹,۱	۴,۴	۴,۴	۴,۴	۹,۶	۶,۵	۳,۳	۲-۱, ۸-۹
۱۵,۶۹	۱۰,۱	۴,۷	۵,۱۸	۴,۷	۵,۲۹	۵,۶	۳,۲۳	۳,۰۴	۲۵,۳	۱۹,۷	۱۴,۳	۹,۱	۴,۴	۴,۴	۴,۴	۹,۶	۶,۳	۳,۳	۳-۲, ۸-۹
۱۵,۶۹	۱۰,۱۶	۴,۸۴	۵,۷۷	۴,۸۴	۵,۳۲	۵,۵۳	۳,۳۱	۳,۲۷	۲۵,۸	۲۰,۳	۱۵	۹,۲	۴,۴	۴,۴	۴,۴	۱۰,۱	۶,۸	۳,۵	۷-۸
۱۵,۷	۱۰,۱۶	۴,۸۴	۵,۷۶	۴,۸۴	۵,۳۲	۵,۵۳	۳,۳۲	۳,۲۸	۲۵,۸	۲۰,۳	۱۴,۹	۹,۲	۴,۴	۴,۴	۴,۴	۱۰,۱	۶,۸	۳,۵	۲-۱, ۷-۸
۱۵,۷۲	۱۰,۱۸	۴,۸۶	۵,۷۲	۴,۸۶	۵,۳۳	۵,۵۴	۳,۳۸	۳,۱۹	۲۵,۷	۲۰,۲	۱۴,۹	۹,۲	۴,۳	۴,۳	۴,۳	۱۰,۰	۶,۶	۳,۵	۳-۲, ۷-۸
۱۵,۷۸	۱۰,۲۷	۴,۹۸	۵,۵۴	۴,۹۸	۵,۲۹	۵,۵۱	۳,۳۶	۳,۳۱	۲۶	۲۰,۵	۱۵,۲	۹,۷	۴,۷	۴,۷	۴,۷	۱۰,۲	۶,۹	۳,۵	۲-۱
۱۵,۸۱	۱۰,۲۹	۴,۹۹	۵,۴۹	۴,۹۹	۵,۳	۵,۵۲	۳,۴۲	۳,۲۲	۲۵,۹	۲۰,۴	۱۵,۱	۹,۶	۴,۶	۴,۶	۴,۶	۱۰,۱	۶,۷	۳,۵	۳-۲

متغیرهای تصادفی مربوط به زمان شروع هر یک از سیکل‌های باربری می‌باشد.

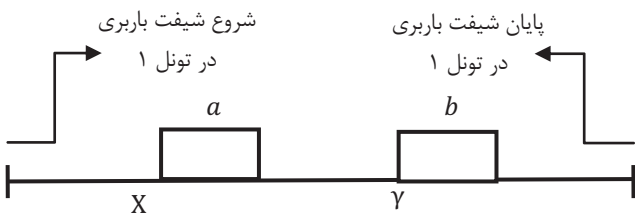
روش تابع توزیع یکی از روش‌های بدست آوردن تابع چگالی یک یا چند متغیره از تابع توزیع توأم همان متغیره است. روش فوق روشی سراسر بوده به این طریق که ابتدا تابع توزیع متغیر مورد نظر محاسبه شده و سپس با مشتق گیری از آن تابع چگالی بدست خواهد آمد [۱۰].

$$F(\gamma) = P(\gamma \leq \gamma) = P[y(x_1, x_2, \dots, x_n \leq \gamma)] \quad (7)$$

برای تعیین چگالی احتمال آن باید معادله زیر حل شود.

$$f(y) = \frac{dF(y)}{dy} \quad (8)$$

با داشتن تابع متغیره‌های مربوط به زمان شروع هر یک از سیکل‌ها می‌توان کلیه حالات را پیش بینی کرد و احتمال مربوط به حضور لوکوموتیو معدنی در هر یک از حالات را با توجه به شکل ۴ محاسبه کرد.



شکل ۶ زمان شروع هر یک از سیکل‌ها در تونل

که در آن:

- $X$ : زمان شروع سیکل اول
- $\gamma$ : زمان شروع سیکل دوم
- $a$ : بازه زمانی سیکل اول
- $b$ : بازه زمانی سیکل دوم
- $T$ : زمان توقف کار

زمان لازم تا شروع سیکل اول  $X$  و تابع احتمال توزیع توأم آن  $f(X)$  معرفی شده است که مقدار آن از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$f(X) = \frac{1}{K} \int_0^{T-X} dy = \frac{1}{K} (T - X) \quad (9)$$

بنابراین

$$f(X) = \begin{cases} \frac{1}{K} (T - X) & 0 < X < T \\ 0 & \text{سایر نقاط} \end{cases} \quad (10)$$

سیکل دوم پس از پایان سیکل اول و استراحت بین دو سیکل آغاز می‌شود، بنابراین که زمان شروع سیکل دوم است،

از آنجا که زمان شروع سیکل‌های مختلف در طول شیفت باربری به صورت کاملاً یکنواخت توزیع شده است، تابع توزیع  $f(x, y)$  یکنواخت انتخاب شده و مطابق رابطه (۶) نتایج زیر حاصل می‌شود:

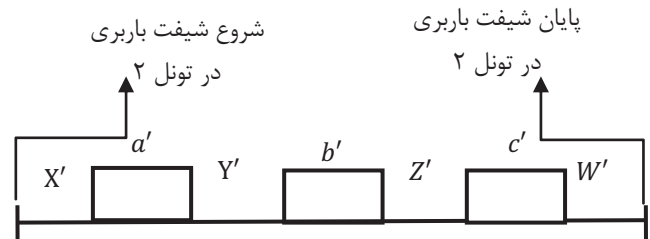
$$f(X, Y) = \frac{1}{K} \quad 0 < X < T, 0 < Y < T, 0 < X + Y < T$$

$$\int_0^T \int_0^{T-X} K dx dy = 1$$

آنگاه:

$$K = \frac{T^2}{2}$$

مطابق شکل ۵، همین منطق و تحلیل را می‌توان برای تونل ۲ کاملاً مشابه با روابط ارئه شده برای تونل ۱ ارائه کرد.



شکل ۵ بازه زمانی مربوط به حرکت لوکوموتیو معدنی در تونل ۲ بر همین اساس تابع توزیع یکنواخت مربوط به زمان‌های شروع سیکل‌ها در تونل ۲ برابر خواهد بود با:

$$f(X', Y', Z') = \frac{1}{K'}$$

که در آن  $K'$  عبارت است از:

#### ۴-۱ توابع متغیره‌های تصادفی مربوط به زمان شروع هر سیکل

از آنجا که زمان شروع حرکت لوکوموتیوهای معدنی در هیچ یک از دو تونل مشخص نیست، لازم است زمان شروع حرکت آنها به صورت متغیر اتفاقی تعریف و سپس توابع توزیع آنها برآورد شود. در واقع در این شرایط، مجموعه‌ای از متغیره‌های تصادفی  $x_1, x_2, \dots, x_n$  و توزیع یا چگالی توأم آنها موجود است، هدف پیدا کردن توزیع یا چگالی متغیر تصادفی  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  است. این رابطه به این معنی است که مقادیر متغیره‌های تصادفی  $\gamma$  به وسیله معادله  $\gamma = \gamma(x_1, x_2, \dots, x_n)$  به مقادیر  $x$  ها بستگی دارد. تابع  $\gamma$ ، تابع توزیع یا چگالی

پس از گذشت زمان لازم برای شروع سیکل اول ( $X$ ) و مدت زمان باربری در سیکل اول ( $a$ ) و زمان توقف بین سیکل اول و دوم ( ) شروع می‌شود. اکنون تابع متغیرهای تصادفی مربوط به زمان شروع سیکل دوم مطابق با رابطه (۱۱) به شرح زیر قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} \gamma &= x + y + a \quad a < \gamma < T + a \\ F(\gamma) &= P(\gamma \leq \gamma) \\ &= P(x + y + a \leq \gamma) \\ &= P(x + y \leq \gamma - a) \\ F(\gamma) &= \frac{1}{K} \int_0^{\gamma-a} \int_0^{\gamma-a-x} dx dy \\ F(\gamma) &= \frac{1}{2K} (\gamma - a)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

با در نظر گرفتن شرایط تابع توزیع احتمال، روابط زیر برقرار خواهد بود:

$$(F(\gamma))' = f(\gamma) = \frac{1}{K} (\gamma - a) \quad (12)$$

بنابراین با مشتقگیری از تابع توزیع احتمال شروع سیکل دوم، تابع چگالی احتمال آن بدست خواهد آمد.

#### ۴ زمان بندی حرکت و محاسبه احتمال حضور لکوموتیو معدنی در تونل‌های ۱ و ۲

با توجه به زمان‌سنجی انجام شده و با در نظر گرفتن سرعت لکوموتیو معدنی و طول تونل‌هایی که لکوموتیو معدنی برای رسیدن به کارگاه‌های استخراج باید طی کند و همچنین زمان لازم برای بارگیری هر یک از واگن‌ها برنامه زمانی حرکت لکوموتیو معدنی در هر یک از تونل‌های ۱ و ۲ به صورت شکل ۷ است. زمان بندی مربوط به هر سیکل در دو تونل در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۸ اگر لکوموتیو معدنی در تونل ۱ در اولین بخش از سیکل اول باشد لکوموتیو معدنی در تونل ۲ ممکن است در هر یک از ۱۷ حالت ممکن برای حضور

زمان بندی سیکل ۱ (ثانیه)

شیفت باربری در تونل ۱	۲۸	۱۴۴۰	۲۸	۲۸	۲۴	۱۴۴۰	۲۴	۲۸
	I	II	II					

الف برنامه زمان بندی لکوموتیو معدنی در هر یک از دو سیکل در تونل ۱

زمان بندی سیکل ۱ (ثانیه)

۴۹	۱۴۴۰	۴۹
----	------	----

زمان بندی سیکل ۲ (ثانیه)

۴۹	۱۶	۱۴۴۰	۱۶	۴۹
----	----	------	----	----

زمان بندی سیکل ۳ (ثانیه)

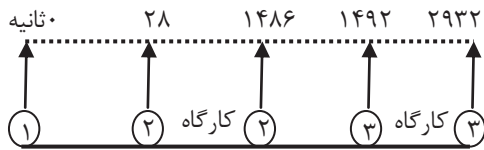
۴۹	۱۶	۲۳	۶۶	۱۴۴۰	۶۶	۲۳	۱۶	۴۹
----	----	----	----	------	----	----	----	----

شیفت باربری در تونل ۲

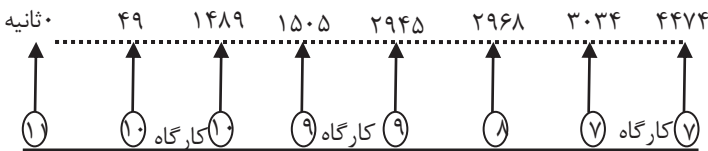
ب برنامه زمان بندی لکوموتیو معدنی در هر یک از سه سیکل در تونل ۲

شکل ۸ برنامه زمان بندی لکوموتیو معدنی در هر یک از دو سیکل

لکوموتیو معدنی در تونل ۲ باشد. مقاومت ناشی از حرکت لکوموتیو معدنی در هر تونل و تأثیر آن بر شدت جریان عبوری از آن شاخه چه در زمان رفت و چه در حرکت برگشت و چه به هنگام ایستادن در تونل به منظور بارگیری یا تخلیه یکسان فرض شده است. مطابق شکل ۸-الف، در تونل ۱ لکوموتیو معدنی تا رسیدن به کارگاه استخراج اول ۲۸ ثانیه در حرکت خواهد بود (بخش ) پس از آن ۱۴۴۰ ثانیه به منظور بارگیری مواد استخراج شده در شاخه ۱-۲ (شکل ۲) توقف خواهد داشت (بخش ). پس از آن به مدت ۲۸ ثانیه شاخه مزبور را برای تخلیه مواد به خارج از معدن طی خواهد کرد. بنابراین مقاومت ناشی از حضور لکوموتیو معدنی در هر سه حالت فوق تنها بر یک شاخه اعمال خواهد شد، پس در تونل ۱ با این فرض می‌توان تعداد حالات حضور لکوموتیو معدنی را خلاصه کرد. تحت شرایط ذکر شده تمام سیکل اول در تونل ۱ و به طور مشابه تمام سیکل اول در تونل دو، یک حالت خواهد بود.



الف برنامه زمانی حرکت لکوموتیو معدنی در تونل ۱



ب برنامه زمانی حرکت لکوموتیو معدنی در تونل ۲

شکل ۷ برنامه زمان بندی حرکت قطارها

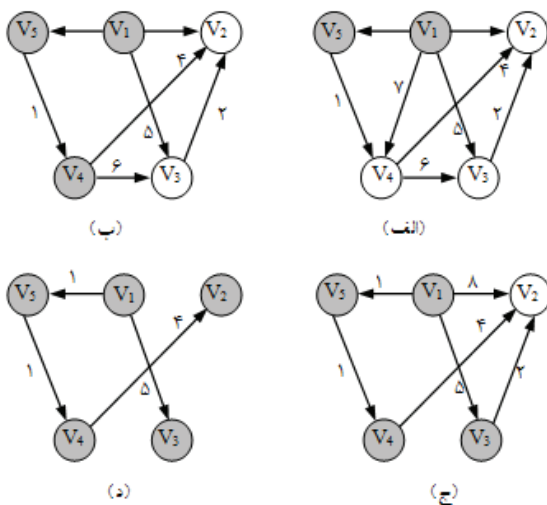
با این فرض، برای محاسبه احتمال حضور لوکوموتیو معدنی ۴۴ حالت وجود خواهد داشت که با داشتن زمان توابع چگالی مربوط به زمان‌های شروع هر یک از سیکل‌ها می‌توان

احتمال هر یک از حالات را بر اساس روابط (۷)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به دست آورد.

جدول ۵ احتمال مربوط به حضور هم زمان لوکوموتیو معدنی در هر یک از تونل‌های باربری در هر دو تونل

شماره شاخه	مجموع حالات احتمال همزمان حضور لوکوموتیو معدنی در شاخه‌های مزبور	احتمال حضور لوکوموتیو معدنی
(۱-۲)، (۱۰-۱۱)	۴۴، ۴۲، ۴۱، ۲۰، ۱۸، ۱۷، ۱۶، ۱۴، ۱۳، ۸، ۶، ۵، ۴، ۲، ۱	۰/۳۴۹۸
(۱-۲)، (۲-۳)	۴۳، ۱۹، ۱۵، ۷، ۳	۰/۰۴۹۵
(۱-۲)، (۱۰-۹)	۳۹، ۳۷، ۳۶، ۲۴، ۲۲، ۲۱، ۱۲، ۱۰، ۹	۰/۱۰۷۶۳
(۲-۳)، (۱۰-۹)	۳۸، ۲۳، ۱۱	۰/۰۵۰۳۳
(۱-۲)، (۹-۸)	۳۶، ۳۴، ۳۳، ۲۸، ۲۶، ۲۵	۰/۰۰۹۴۳۳
(۱-۲)، (۹-۸)	۳۵، ۲۷	۰/۰۰۵۴۰۶
(۱-۲)، (۷-۸)	۳۲، ۳۰، ۲۹	۰/۰۳۶۲۳۳
(۲-۳)، (۷-۸)	۳۱	۰/۰۵۴۶۶

( $V_1V_5$ ) نیز به مجموعه {F} اضافه می‌شود، سپس مسیرهایی از  $V_1$  به رئوس موجود در مجموعه {V-Y} (بخوانید مجموعه V منهای Y) مورد بررسی قرار می‌گیرند. بر این اساس، مسیر ( $V_1V_5V_4$ ) سریع‌ترین مسیر است. این مسیر در شکل ۹-ب نشان داده شده است. رأسی که در انتهای چنین مسیری باشد به مجموعه {Y} و یالی (بر روی مسیر) که آن رأس را در برگیرد، یعنی ( $V_5V_4$ )، به مجموعه {F} افزوده و سایر یال‌هایی که به آن رأس ختم می‌شوند، حذف می‌شوند شکل ۹-ب.



شکل ۹ مثالی از کاربرد روش دیکسترا

این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که {Y} با {V} یعنی مجموعه همه رئوس برابر شود. در این حالت مجموعه {F}

به ازای هر یک از حالات حضور قطار، توزیع شدت جریان شاخه‌های مختلف تغییر می‌کند. توزیع تغییرات شدت جریان تحت این شرایط بر اساس حداقل یکی از آزمون‌های انطباق (چی اسکوتر و کلموگروف اسمیرنوف) تابع توزیع نرمال است.

### ۵- محاسبه قابلیت اعتماد شبکه تهویه تخت با الگوریتم دیکسترا

الگوریتم دیکسترا برای حل مسائل بهینه‌سازی و یافتن سریع‌ترین مسیر در یک گراف از یک رأس به سایر رئوس ارائه شده است. این الگوریتم با بهره‌مندی از منطق ریاضی تضمین می‌کند که جستجوی سریع‌ترین مسیر بر روی گراف، منجر به ارائه جواب بهینه شود [۱۱].

در روش مبتنی بر الگوریتم دیکسترا ابتدا مجموعه {V} که شامل تمام رئوس گراف است، انتخاب می‌شود. سپس دو مجموعه تهی، یکی به صورت زیرمجموعه‌ای تهی از یال‌ها، به نام {F} و دیگری زیرمجموعه‌ای تهی از رئوس، به نام {Y} تعریف می‌شوند. برای مقاردهی اولیه به مجموعه {Y} رأسی به صورت دلخواه انتخاب می‌شود. سپس کوتاهترین مسیر بین آن رأس و سایر رئوس مشخص می‌شود [۱۱]. برای مثال بر روی گراف نشان داده شده در شکل ۹-الف، با فرض این که  $V_1$  رأس دلخواه باشد، ابتدا رأس  $V_1$  در مجموعه {Y} قرار می‌گیرد. سپس رأس  $V_5$  عضو مجموعه {V} که از همه به  $V_1$  نزدیک‌تر است، انتخاب و به مجموعه {Y} افزوده می‌شود و یال

قابلیت اعتماد شبکه‌های تهویه نیستند. بر اساس روش نوین ارائه شده در این مقاله ابتدا قابلیت اعتماد هر یک از شاخه‌ها به صورت جداگانه و با در نظر گرفتن معیارهای عملکرد رضایت بخش در هر شاخه محاسبه می‌شود و سپس قابلیت اعتماد شبکه با کاربرد الگوریتم دیکسترا محاسبه می‌شود.

#### ۷- تقدیر و تشکر

مؤلفان از آقای دکتر احمد نزاکتی، عضو هیئت علمی دانشکده ریاضی دانشگاه صنعتی شاهرود به دلیل همکاری ایشان در مدل‌سازی احتمالاتی و تحلیل آن قدردانی می‌کنند.

#### مراجع

- [1] Modarres, M., Kaminskiy, M. and Krirtsov, V.; 1999; "Reliability engineering and risk analysis, New York Marcel Dekker, pp. 16-388.
- [2] Billinton, R., Allan, R.N.; 1992; "Reliability Evaluation Of Engineering Systems, New York And London, Second Edition, pp.453.
- [3] Dhillon, B.S.; 2008; "Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety, Springer, pp. 209.
- [4] Jalali, S.E., Sereshki, F. And Rezaei, Z.; 2009; "The reliability of ventilation network, Ninth International Mine Ventilation Congress, pp. 651- 663.
- [5] Hartman, H.L., Britton, S.G., Mutmansky, J.M., Gentry, D.W., Josph Schlitt, W., Karmis, M. And Singh, M.M.; 1992; "SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, pages 1052- 1106.
- [6] Rezaei, Z., Jalali, S.E., Sereshki, F., 2009. Modeling of reliability of ventilation network, International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, pp. 544-537.
- [7] Iida, Y., Wakabayashi, H. 1989. An approximation method of terminal reliability of road network using partial minimal path and cut set, Proceedings of the Fifth WCTR, vol. IV, Yokohama, P.P. 367-380.

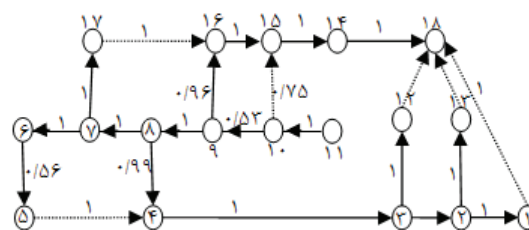
[۸] ربیع نژاد، ح؛ فعالیان خ؛ و الهی الف؛ (۱۳۸۷)؛ تجزیه و تحلیل شبکه تهویه معدن رضی با استفاده از نرم افزار ventsim؛ تهیه شده در دفتر فنی و طراحی معدن رضی؛

[9] Hall, G.J.; 1981; "Mine ventilation engineering, Society for mining metallurgy, pp. 344.

[۱۰] فروند، ج. و والپول، ر؛ ترجمه عمیدی، ع؛ وحیدی اصل، م (۱۳۷۱)؛ آمار ریاضی؛ مرکز نشر دانشگاهی؛ ص ۲۷۱-۲۱۱

[۱۱] کرمن، ت؛ لیزرسان، چ؛ رایوست، ر؛ استاین، ک؛ ترجمه گروه پژوهشی خوارزمی؛ (۱۳۸۵)؛ مقدمه‌ای بر الگوریتم‌ها؛ نشر درخشش، صفحه ۷۲۵

شامل یال‌های موجود بر روی مسیر متناظر با سریع‌ترین مسیر است. این مراحل در شکل‌های ۹- ج و ۹- د نشان داده شده است. در شکل ۱۰ نتیجه اجرای الگوریتم دیکسترا بر روی گراف شکل ۲، با انتخاب گره شماره ۱۱ به عنوان گره آغازین و گره ۱۸ به عنوان گره پایانی نشان داده شده است. اولین عضو مجموعه {Y} گره شماره ۱۱ گره آغازین شبکه تهویه معدن تخت است. گره شماره ۱۰ تنها عضو واقع در مسیر عبور هوا دومین عضو مجموعه {Y} خواهد بود. بین گره‌های ۱۵ و ۹ از آنجائی که حاصل ضرب قابلیت اعتماد هر شاخه با انتخاب گره ۹ کمترین خواهد شد، عضو بعدی مجموعه گره ۹ خواهد بود. در این مرحله اعضای مجموعه {Y} = {۹، ۱۰، ۱۱} خواهد بود. سایر اعضای مجموعه {Y} بر اساس این الگوریتم محاسبه شده است.



شکل ۱۰ نتیجه اجرای الگوریتم دیکسترا بر روی گراف شکل ۲

بنابراین قابلیت اعتماد شبکه تهویه بین گره ورودی و خروجی برابر با برابر با ۰/۳۰ (شامل گره‌های ۱۱، ۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱) خواهد بود.

#### ۶- نتیجه‌گیری

شبکه‌های تهویه در معادن زیرزمینی همواره تحت تأثیر عواملی نظیر قرار گرفتن اجسام در مسیر عبور هوا و خرابی سیستم‌های نگهداری دچار ناپایداری در شدت جریان می‌شوند. در حالی که ملاحظات اقتصادی و ایمنی در یک معدن زیرزمینی ایجاب می‌کند که شبکه تهویه آن به نحوی مؤثر، ایمن و قابل اطمینان بتواند میزان هوای مورد نیاز در نقاط مختلف شبکه را تأمین کند. بنابراین لازم است، اثر هر نوع مانع به ویژه حضور لکوموتیو معدنی در راهروهای معدن که باعث بروز افت موضعی و تغییر شدت جریان در شاخه‌های شبکه معدن می‌شود، بررسی شود و بر اساس شدت جریان-های تغییر یافته میزان قابلیت اعتماد شبکه برآورد شود. تاکنون هیچ روشی برای ارزیابی قابلیت اعتماد شبکه تهویه ارائه نشده است و روش‌های موجود که برای تعیین قابلیت اعتماد شبکه‌های توزیع برق، ترافیک و امثال آنها ارائه شده‌اند به دلیل تفاوت در ماهیت ارزیابی قابل استفاده در برآورد