

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل قابلیت اطمینان در شبکه‌های تهویه معادن

مطالعه موردی: معدن تخت

اساتید راهنما

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر فرهنگ سرشکی

دانشجو

زهره رضائی

تابستان ۱۳۸۹

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه: استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای/خانم زهره رضائی
تحت عنوان: قابلیت اطمینان در شبکه‌های تهویه معادن
(مطالعه موردی: معدن تخت)

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی
و با درجهمورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: دکتر سید محمد اسماعیل جلالی
	نام و نام خانوادگی: دکتر فرهنگ سرشکی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:

به نام او

به یاد او

برای او،

که دوستش دارم.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم و همه آنهایی که در سایه مهربانی او

تلاش برای ایستادن بر اوج راه من آموختند.

قدردانی

اول از همه، سپاس و تشکر ویژه خود را نثار می‌کنم به اساتید بزرگوارم، آقایان دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر فرهنگ سرشکی، که پشتیبانی‌های علمی و معنوی ایشان قابل جبران نیست.

از اساتید ارجمندم آقایان دکتر رضا خالو کاکائی و دکتر محمد عطائی که زحمت مطالعه و داوری این پایان‌نامه را کشیده‌اند کمال تشکر را دارم.

قدردانی می‌کنم از والدینم، که سایه پر مهر پدرم و دعای خیر مادرم، آرام بخش لمظات نگرانی و سفت زندگی و مایه دلگرمی و قوت قلب من بوده است. فدای مهربان مرا از این نعمت محروم نسازد.

و اما بعد در مرامل مختلف انجام این کار تمقیقاتی، از کمک‌های معنوی بسیاری از دوستان بهره بردم و کمال تشکر را دارم، از خانم‌ها، سمیرا زندی، زینب رنجبر فلهیانی، سارا فلاح پیشه، سمیرا الهیاری، مهدیه عبدلی، سمیه تیموری، ندا جنتی و (زیتا ممیدی).

چکیده

مهندسان و مدیران فنی در هر جامعه مدرن مسئول برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و بهره‌برداری از ساده‌ترین محصول تا پیچیده‌ترین سیستم‌ها هستند. از کار افتادن محصول‌ها و خرابی سیستم‌ها موجب وقوع اختلال در سطوح مختلف می‌شود و حتی به عنوان تهدیدی جدی برای جامعه و محیط زیست تلقی می‌شود. از این رو مصرف‌کنندگان و به طور کلی مردم جامعه انتظار دارند که محصول‌ها و سیستم‌ها پایا، اطمینان بخش و ایمن باشند. بنابراین به عنوان یک پرسش اساسی همواره این مسأله مطرح است که قابلیت اطمینان سیستم در طول مدت بهره‌برداری از آن چه میزان و ایمنی آن چقدر است؟

شبکه تهویه در معادن زیرزمینی 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 اطمینان شبکه در شرایط عدم قطعیت بررسی شود. 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. برای طراحی یا ارزیابی یک شبکه تهویه در راستای دستیابی به اهداف مورد انتظار 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 قابلیت اطمینان شبکه تهویه وجود ندارد. به نظر می‌رسد محاسبه قابلیت اطمینان اجزای شبکه و در نهایت محاسبه قابلیت اطمینان شبکه، بهترین روش برای دست یابی به این هدف باشد. بنابراین ابتدا لازم است قابلیت اطمینان به هر شاخه و سپس قابلیت اطمینان به شبکه تعریف شود. در این تحقیق ابتدا قابلیت اطمینان به اجزای شبکه یعنی شاخه‌ها که هر یک مشخص کننده یک کار معدنی است تعریف شده است، بر این اساس قابلیت اطمینان یک شاخه متناسب با افزایش مقاومت آن شاخه و کاهش شدت جریان نسبت به شدت جریان طراحی شده در هر شاخه تعریف شده است. 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. طبیعتاً در معادنی که با استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی جابه‌جایی مواد و مصالح انجام می‌شود، حضور قطار در یک تونل به عنوان مهمترین عامل تغییر شدت جریان به شمار می‌رود. در این تحقیق با توجه به تابع توزیع تغییرات شدت جریان هر شاخه ناشی از حرکت قطار در تونل‌های باربری، قابلیت اطمینان هر شاخه از شبکه تعریف شده است. سپس با کاربرد روش جدیدی مبتنی بر مسیرهای انقطاع و الگوریتم دیکسترا قابلیت اطمینان شبکه تهویه برآورد شده است. در نهایت برای هویت بخشی به تعاریف و روش‌های ارائه شده، قابلیت اطمینان شبکه تهویه معدن تخت برآورد شده است.

کلمات کلیدی: تهویه، شبکه، قابلیت اطمینان، شدت جریان

لیست مقالات استخراج شده از این پایان نامه:

1. Jalali, S. M. E., Sereshki, F., Rezaei, Z. THE RELIABILITY OF VENTILATION NETWORKS, Ninth International Mine Ventilation Congress 2009.
2. MSc Student. Rezaei, Z, Assistant prof. Jalali, S.E, Assistant prof.Sereshki, F, MSc Student. SHoumer, Y. MODELING OF THE RELIABILITY OF VENTILATION NETWORKS, International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2009.

۳. رضائی زهره، جلالی سید محمد اسماعیل، سرشکی فرهنگ، تحلیل قابلیت اطمینان در

شبکه‌های تهویه به روش نمودارهای منطقی، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، بهمن ۸۸.

۴. رضائی زهره، جلالی سید محمد اسماعیل، سرشکی فرهنگ، بررسی اثر حرکت قطار بر قابلیت

اطمینان شبکه‌های تهویه معادن زیرزمینی (مطالعه موردی: معدن تخت)، مجله علمی پژوهشی

انجمن مهندسی معدن ایران، تحت داوری.

فهرست مطالب

فصل اول

قابلیت اطمینان؛ مفاهیم و تعاریف

۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تاریخچه قابلیت اطمینان.....	۳
۳-۱- پیشینه مطالعات.....	۶
۴-۱- تعاریف و اصول موضوعه.....	۱۲
۱-۴-۱- قابلیت اطمینان.....	۱۳
۲-۴-۱- توابع کلی قابلیت اطمینان.....	۱۷
۳-۴-۱- شکل توابع قابلیت اطمینان.....	۲۰
۴-۴-۱- پایداری.....	۲۲

فصل دوم

روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان

۱-۲- مقدمه.....	۲۵
۲-۲- ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها بر مبنای روش‌های تحلیلی.....	۲۵
۱-۲-۲- مدل‌سازی شبکه و ارزیابی سیستم‌های ساده.....	۲۶
۱-۱-۲-۲- مدل‌سازی سیستم‌های با شبکه سری.....	۲۶
۲-۱-۲-۲- مدل‌سازی سیستم‌های با شبکه موازی.....	۲۷
۳-۱-۲-۲- مدل‌سازی سیستم‌های با شبکه سری- موازی.....	۲۸
۴-۱-۲-۲- مدل‌سازی سیستم با آرایش k از m.....	۲۹
۲-۲-۲- مدل‌سازی شبکه و ارزیابی سیستم‌های پیچیده.....	۲۹
۱-۲-۲-۲- روش احتمال شرطی.....	۳۱
۲-۲-۲-۲- روش مجموع انقطاع.....	۳۳
۱-۲-۲-۲- روش استفاده از مجموعه‌های انقطاع.....	۳۴
۲-۲-۲-۲- ارزیابی تقریبی.....	۳۵
۳-۲-۲-۲- شناسایی مجموعه‌های انقطاع.....	۳۷
۳-۲-۲-۲- شیوه مجموعه اتصال.....	۳۸
۴-۲-۲-۲- شیوه ماتریس اتصال.....	۴۰
۱-۴-۲-۲-۲- روش حذف گره‌ها.....	۴۱
۲-۴-۲-۲-۲- روش ضرب کردن ماتریس‌ها.....	۴۲

۴۴.....۵-۲-۲-۲- شیوه درخت رخدادها

۴۷.....۶-۲-۲-۲- شیوه درخت معایب

۴۷.....۱-۶-۲-۲-۲- نمادهای مورد استفاده در نمودار درخت معایب

۴۹.....۲-۶-۲-۲-۲- بررسی کمی احتمال حادثه نهایی

۵۱.....۳-۲- ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم بر مبنای توزیع‌های احتمال

۵۱.....۱-۳-۲-۱- توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته

۵۳.....۱-۳-۲-۱-۱- توزیع نمایی

۵۴.....۲-۳-۲-۱-۲- توزیع ویبل

۵۴.....۳-۳-۲-۱-۳- توزیع گاما

۵۵.....۴-۳-۲-۱-۴- توزیع مربع چی

۵۵.....۵-۳-۲-۱-۵- توزیع لاگ نرمال

۵۵.....۶-۳-۲-۱-۶- توزیع بتا

۵۶.....۷-۳-۲-۱-۷- توزیع پارتو

۵۶.....۸-۳-۲-۱-۸- توزیع نرمال

۵۶.....۹-۳-۲-۱-۹- تابع چگالی توزیع نرمال

۵۸.....۲-۳-۲-۲- توابع توزیع متغیرهای تصادفی گسسته

۵۸.....۱-۲-۳-۲-۱- توزیع دو جمله‌ای

۵۹.....۲-۳-۲-۲-۲- توزیع پواسون

۶۰.....۳-۳-۲-۲-۳- توزیع هندسی

۶۰.....۴-۳-۲-۲-۴- توزیع فوق هندسی

۶۲.....۳-۳-۲-۳- تحلیل اطلاعات

۶۴.....۴-۳-۲-۴- آزمونهای چگونگی انطباق

۶۵.....۱-۴-۳-۲-۱- آزمون چی اسکوتر

۶۶.....۲-۴-۳-۲-۲- آزمون کلموگروف - اسمیرنوف

۶۷.....۴-۲- ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم بر مبنای روش‌های شبیه‌سازی

۶۸.....۱-۴-۲-۱- شبیه‌سازی مونت کارلو

۶۹.....۲-۴-۲-۲- الگوریتم‌های مونت کارلو برای شبیه‌سازی قابلیت اطمینان

۷۱.....۳-۴-۲-۳- روش زنجیره‌های مارکوف

۷۲.....۵-۲- نتیجه‌گیری

فصل سوم

قابلیت اطمینان در شبکه تهویه

- ۱-۳- مقدمه..... ۷۶
- ۲-۳- شبکه‌های تهویه..... ۷۹
- ۱-۲-۳- شبکه سری..... ۷۹
- ۲-۲-۳- شبکه موازی..... ۸۰
- ۳-۲-۳- شبکه قطری..... ۸۱
- ۴-۲-۳- شبکه مرکب..... ۸۳
- ۴-۳- مدل‌سازی شبکه‌های تهویه..... ۸۳
- ۵-۳- شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه تهویه..... ۸۴
- ۶-۳- معیار عملکرد رضایت‌بخش در هر شاخه از شبکه تهویه..... ۸۵
- ۷-۳- رده بندی تغییرات شدت جریان نسبت به مقادیر پیشینی شده..... ۸۶
- ۱-۷-۳- شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای متصاعد شده از زغال‌سنگ و لایه‌های درونگیر آن (رده I)..... ۸۶
- ۲-۷-۳- سقف و کف سرعت مجاز عبور هوا (رده II)..... ۸۷
- ۳-۷-۳- شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای حاصل از مصرف مواد منفجره (رده III)..... ۸۸
- ۳-۷-۴- شدت جریان لازم بر اساس تعداد نفراتی که مشغول به کار هستند (رده IV)..... ۸۸
- ۸-۳- قابلیت اطمینان در شبکه‌های تهویه..... ۸۸
- ۱-۸-۳- برآورد قابلیت اطمینان در هر شاخه..... ۸۹
- ۲-۸-۳- برآورد قابلیت اطمینان در شبکه‌های تهویه..... ۹۱
- ۳-۸-۳- نمودار بلوکی و شناسایی مجموعه‌های انقطاع..... ۹۲
- ۴-۸-۳- الگوریتم دیکسترا..... ۹۲
- ۵-۸-۳- ارائه الگوریتم دیکسترا برای تحلیل شبکه‌های معدنی..... ۹۳

فصل چهارم

برآورد قابلیت اطمینان شبکه تهویه معدن تخت

- ۱-۴- معرفی معدن زغال‌سنگ تخت..... ۹۷
- ۲-۴- مدل‌سازی شبکه تهویه به صورت یک گراف..... ۱۰۰
- ۳-۴- تحلیل شبکه تهویه معدن تخت..... ۱۰۱
- ۱-۳-۴- محاسبه مقاومت ناشی از اصطکاک..... ۱۰۱

- ۱۰۳-۲-۳-۴- محاسبه مقاومت ناشی از حضور قطار.....
- ۱۰۴-۳-۴-۴- محاسبه شدت جریان
- ۱۰۵-۴-۴- مدل سازی حرکت قطارها.....
- ۱۰۸-۱-۴-۴- توابع متغیرهای تصادفی مربوط به زمان شروع هر سیکل.....
- ۱۱۰-۲-۴-۴- زمان بندی حرکت و محاسبه احتمال حضور قطار در تونل های ۱ و ۲.....
- ۱۱۵-۳-۴-۴- محاسبه قابلیت اطمینان هر یک از شاخه ها.....
- ۱۲۳-۵-۴- تحلیل قابلیت اطمینان شبکه تهویه معدن تخت.....
- ۱۲۳-۱-۵-۴- نمودار بلوکی و شناسایی مجموعه های انقطاع.....
- ۱۲۷-۲-۵-۴- محاسبه قابلیت اطمینان شبکه تهویه تخت با الگوریتم دیکسترا.....

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱۳۰-۱-۵- نتیجه گیری.....
- ۱۳۱-۲-۵- پیشنهادات.....

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱- شبکه گرافی معدن زغال سنگ. ۱۲
- شکل ۲-۱- مقادیر قطعی بار و مقاومت ۱۵
- شکل ۳-۱- مقدار احتمالی L_p همراه با مقدار قطعی L_c ۱۶
- شکل ۴-۱- مقادیر احتمالی L_p و L_c ۱۷
- شکل ۵-۱- نمونه‌ای از تغییرات آهنگ وقوع خطر بر حسب سن کارکرد برای قطعات الکترونیکی ۲۱
- شکل ۱-۲- سیستم با دو عضو سری ۲۶
- شکل ۲-۲- سیستم با دو عضو موازی ۲۷
- شکل ۳-۲- شبکه پل ۳۰
- شکل ۴-۲- زیر سیستم‌های شبکه پل ۳۲
- شکل ۵-۲- کوچکترین مجموعه‌های انقطاع شبکه پل ۳۴
- شکل ۶-۲- مجموعه اتصال شبکه پل ۳۸
- شکل ۷-۲- شبکه پل با شماره‌گذاری گره‌ها ۴۰
- شکل ۸-۲- درخت رخدادها برای شبکه پل ۴۶
- شکل ۹-۲- مثال‌هایی از نمادهای درخت معایب ۴۸
- شکل ۱۰-۲- ترسیمی از یک درخت معایب ۵۰
- شکل ۱۱-۲- تابع چگالی احتمال فرضی ۵۳
- شکل ۱۲-۲- تابع‌های احتمال توزیع نرمال ۵۷
- شکل ۱۳-۲- تحلیل اصول قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه موازی ۷۳
- شکل ۱-۳- شبکه تهویه با اتصال سری ۷۹
- ب- اتصال چند طبقه از معدن به حالت سری ۷۹
- الف- شبکه استخراج یک لایه ۷۹
- شکل ۲-۳- شبکه تهویه با اتصال موازی ۸۰
- شکل ۳-۳- شبکه قطری ۸۱
- شکل ۴-۳- تابع توزیع تغییرات شدت جریان ۹۰
- شکل ۵-۳- مثالی از کاربرد روش دیکسترا ۹۴
- شکل ۱-۴- موقعیت جغرافیایی معدن تخت ۹۸
- شکل ۲-۴- شبکه تهویه فعلی معدن زغال سنگ تخت ۱۰۰
- شکل ۳-۴- شبکه گرافی مربوط به معدن تخت ۱۰۱

- شکل ۴-۴ بازه زمانی مربوط به حرکت قطار در تونل یک ۱۰۶
- شکل ۴-۵ بازه زمانی مربوط به حرکت قطار در تونل ۲ ۱۰۷
- شکل ۴-۶ زمان شروع هر یک از سیکلها در تونل ۱۰۹
- شکل ۴-۷ برنامه زمان بندی حرکت قطارها ۱۱۱
- شکل ۴-۸ برنامه زمان بندی قطار در هر یک از دو سیکل ۱۱۱
- شکل ۴-۹ حدود انتگرال گیری به منظور محاسبه احتمال حضور همزمان قطار در شاخه های (۱-۲) و (۱۰-۱۱) ۱۱۳
- شکل ۴-۱۰ حدود انتگرال گیری به منظور محاسبه احتمال حضور همزمان قطار در شاخه های (۱-۲) و (۱۰-۱۱) ۱۱۴
- شکل ۴-۱۱ حالات مختلف حضور هم زمان قطار در هر یک از تونل های باربری در هر دو تونل ۱۱۴
- شکل ۴-۱۲ مثال از کار افتادگی فاجعه آمیز و از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک محدوده معین برای شاخه ۱۰-۱۱ ۱۲۲
- شکل ۴-۱۳ نمودار بلوکی مربوط به شبکه تهویه معدن تخت ۱۲۳
- شکل ۴-۱۴ نتیجه اجرای الگوریتم دیکسترا بر روی گراف وزن دار با حد بالای قابلیت اطمینان معدن تخت ۱۲۷
- شکل ۴-۱۵ نتیجه اجرای الگوریتم دیکسترا بر روی گراف وزن دار با حد پایین قابلیت اطمینان معدن تخت ۱۲۸

فهرست جداول

جدول ۱-۲ - کوچکترین مجموعه‌های انقطاع شبکه پل.....	۳۵
جدول ۲-۲ - توابع توزیع مورد استفاده در آنالیز قابلیت اطمینان.....	۶۳
جدول ۳-۲ - روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان.....	۷۵
جدول ۱-۳ - مقادیر مجاز سرعت در قسمت‌های مختلف معدن.....	۸۸
جدول ۱-۴ - ضرایب اصطکاک مربوط به بخش‌های مختلف.....	۱۰۲
جدول ۲-۴ - مشخصات شاخه‌های شبکه تهویه تخت.....	۱۰۲
جدول ۳-۴ - مشخصات فن شبکه تهویه معدن تخت.....	۱۰۴
جدول ۴-۴ - شدت جریان شاخه‌های مربوط به شبکه تخت.....	۱۰۴
جدول ۵-۴ - احتمال مربوط به حضور هم زمان قطار در هر یک از بخش‌های تونل‌های باربری.....	۱۱۵
جدول ۶-۴ - احتمال حضور قطار در هر یک از شاخه‌های شبکه در طول ۳ شیفت کاری.....	۱۱۶
جدول ۷-۴ - خروجی نرم‌افزار بست فیت برای شاخه ۱-۲ از شبکه تهویه تخت.....	۱۱۷
جدول ۸-۴ - تغییرات شدت جریان نسبت به احتمال حضور قطار در هر یک از شاخه‌ها.....	۱۱۸
جدول ۹-۴ - اطلاعات مربوط به محاسبه قابلیت اطمینان هر یک از شاخه‌ها.....	۱۱۹
جدول ۱۰-۴ - ماتریس مربوط به شناسائی مجموعه‌های انقطاع شبکه تهویه.....	۱۲۴
جدول ۱۱-۴ - مسیرهای انقطاع مربوط به نمودار بلوکی ۴-۱۰.....	۱۲۶

فصل اول

قابلیت اطمینان؛ مفاهیم و تعاریف

۱-۱- مقدمه

مهندسان و مدیران فنی در هر جامعه مدرن مسئول برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و بهره‌برداری از ساده‌ترین محصول تا پیچیده‌ترین سیستم‌ها هستند. از کار افتادن و خرابی سیستم‌ها موجب وقوع اختلال در سطوح مختلف شده و به عنوان تهدیدی جدی برای جامعه و محیط زیست تلقی می‌شود. از این رو مصرف‌کنندگان و به طور کلی مردم جامعه انتظار دارند که محصولات و سیستم‌ها پایا، اطمینان بخش و ایمن باشند. بنابراین به عنوان یک پرسش اساسی همواره این مسأله مطرح است که قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم در طول مدت بهره‌برداری از آن چقدر است؟

قابلیت اطمینان یک شاخص مهندسی عمومی برای ارزیابی اطمینان از عملکرد مناسب سیستم‌های مختلف مهندسی است. این شاخص 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 مورد استفاده قرار گرفته است.

تهویه مناسب در معادن موضوعی است که در سال‌های اخیر در محدوده مهندسی معدن از اهمیت ویژه و روز افزونی برخوردار شده است. این حقیقت نه فقط حمل بر تقاضای شرایط بهتر کار و مسائل مربوط با معادن عمیق‌تر و گرم‌تر می‌شود بلکه وقوف بیشتر بر اثرات سودمند تهویه مناسب، در

تخفیف خطرات ناشی از حضور گاز متان و گرد و غبار دارد. اکثر کشورها رعایت قوانین معینی در زمینه تهویه در معادن و تونل‌های زیرزمینی را لازم دانسته‌اند. این مقررات معمولاً بر اساس کمترین مقدار هوای لازم با حداقل معیار خلوص برای هر نفر در زیرزمین مربوط به گازهای قابل اشتعال و زبان آور یا گرد و غبار تعیین شده است (زاد یوسفی، ۱۳۵۹).

در این پایان نامه مدل‌سازی و شبیه سازی قابلیت اطمینان شبکه تهویه معدن تخت هدف قرار گرفته است. در طی این پایان نامه سعی شده است تا با مدل‌سازی این کمیت مهم در عملیات تهویه، راهکارهای عملی برای پیش‌بینی ناکارآمدی شبکه‌های تهویه ارائه شود.

در فصل اول این نوشتار کلیات و پیشینه قابلیت اطمینان، سیر تکاملی، دامنه کاربردی، تعاریف و اصول موضوعه مربوط به قابلیت اطمینان معرفی می‌گردد.

در فصل دوم، روش‌های بررسی قابلیت اطمینان معرفی شده و مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها ارائه شده است. سپس روابط ریاضی و نیز توزیع‌های مختلف آماری مورد استفاده در مدل‌سازی قابلیت اطمینان بررسی شده است.

در فصل سوم، قابلیت اطمینان در شبکه‌های تهویه تحلیل شده و شاخص‌های قابلیت اطمینان برای شاخه و انواع شبکه ارائه شده است.

در فصل چهارم به چگونگی برآورد قابلیت اطمینان شبکه تهویه معدن تخت پرداخته شده است. و بخش نهایی مربوط به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پایان نامه است.

۱-۲- تاریخچه قابلیت اطمینان

مهندسی قابلیت اطمینان، به عنوان یک گرایش جداگانه از مهندسی نظامی در سال ۱۹۵۰ در ایالات متحده آمریکا بنیان گذاری شد. پیچیده و گسترده شدن سیستم‌های الکترونیکی صنایع نظامی باعث افزایش نرخ شکست و در نتیجه کاهش دسترس‌پذیری و در نهایت باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. بر

اساس مطالعات دراز مدت پایگاه تکنولوژی الکترونیکی صلب^۱ با کوچک شدن قطعات در صنایع الکترونیکی و پیچیدگی سیستم‌ها قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد. گسترش استفاده از قطعات کوچک الکترونیکی به منظور توسعه صنایع الکترونیکی نظامی، استفاده از قطعات جدید را اجتناب ناپذیر کرده و همین امر سبب کاهش قابلیت اطمینان می‌شود.

لزوم استفاده از تجهیزات الکترونیکی و هزینه تعمیر و نگهداری به طور جدی بر قابلیت اطمینان تأثیر دارد. با این پیش‌زمینه وزارت دفاع آمریکا و صنایع الکترونیکی این کشور گروه مشورتی قابلیت اطمینان صنایع الکترونیکی آگری^۲ را در سال ۱۹۵۲ تأسیس نمودند.

گزارش‌های آگری این‌گونه بیان شد که حرکت رو به جلو توسعه قطعات الکترونیکی همگام با افزایش هزینه‌ها بوده و هر دوی این موارد سبب کاهش قابلیت اطمینان می‌گردند به طوری که در نتیجه این افزایش هزینه و کاهش قابلیت اطمینان صنایع نظامی بایستی فعالیت خود را در توسعه صنایع الکترونیکی متوقف نمایند. این گزارش سبب شد که هر یک از تجهیزات جدید برای هزاران ساعت تحت شرایط متغیر محیطی چون بالا و پائین شدن درجه حرارت، ارتعاشات و فعال و غیر فعال کردن مورد آزمایش واقع شوند تا نقاط ضعف اصلی شناسائی شده و در نتیجه تولید اصلی اصلاح شود. به گونه‌ای که ساعت‌ها آزمایش صورت می‌گرفت تا بهترین شرایط برای تولیدات بهتر شناسائی شود.

گزارش‌های آگری از طرف وزارت دفاع مورد قبول واقع شد و در مدت زمان کوتاه این آزمایش‌های تبدیل به یک دستورالعمل استاندارد شد. شرکت‌هایی که ملزم به انجام آزمایش‌های گران قیمتی به شیوه سنتی بودند به زودی دریافتند که با استفاده از این استاندارد می‌توانند قابلیت اطمینان بالاتری با هزینه کمتری به دست آورند.

¹ Solid state electronics technology

² AGREE

واضح است که دست یافتن به قابلیت اطمینان بالاتر محقق نمی‌شود مگر اینکه تعداد آزمایش‌های افزوده شود تا اینکه نقاط ضعف احتمالی شناسائی شوند. سیستم‌های پیچیده و عوامل استفاده شده در هر یک از آنها شامل متغیرها و فعل و انفعالات فراوانی است که سبب اشتباهات و لغزش‌های انسانی می‌شود به گونه‌ای که حتی دقت و بازبینی مجدد طراحان نیز نمی‌توانند تولیدات مناسبی را حاصل کند. صنایع دفاع^۱ چاپ مجددی از گزارش‌های اگری را با نام استانداردهای نظامی امریکا^۲ ارائه کرد. با پیشرفت مداوم صنایع الکترونیکی، این صنایع به سوی ریز مدارهای یکپارچه سوق پیدا کرده‌اند و اهمیت آنها اکنون در تولید تجهیزات با کیفیت بالا کاملاً مشهود است.

قابلیت اطمینان در صنایع ژاپن و تولیدات تجاری در مواردی چون صنایع اتومبیل، سیستم‌ها و اجزای الکترونیکی و وسایل مکانیکی، با همکاری آمریکا از سال ۱۹۸۰ آغاز شد. با این شیوه هزینه‌ها کاهش یافته و میزان بازدهی بسیار بالا می‌رود. انقلاب کیفیت ژاپن^۳ توسط افراد آمریکائی پدید آمد که از جمله این افراد می‌توان به جوران^۴ و ادواردز^۵ اشاره کرد آنها اصول مدیریت کیفیت جامع^۶ و بهره‌برداری پیوسته را آموزش دادند.

اصول مدیریت کیفیت جامع ارائه شده به طور مؤثر در تکنیک‌های آمریکائی ریشه دار شد. آنها در نتیجه کاربرد اصول مدیریت کیفیت جامع به تولیدات بسیار زیاد با کیفیت بالا دست یافتند و از این طریق توانستند نفوذ بسیار بالائی در بازار به دست آورند.

به هر حال نتایج حاصله از کار افراد ژاپنی را می‌توان در نمایشگاه‌ها، مغازه‌ها، ادارات و کارخانه‌ها به وضوح مشاهده کرد. امروزه از تمام وسائلی که استفاده می‌شود قابلیت اطمینان بسیار بالائی انتظار می‌رود. سیستم‌های پیشرفته از جمله تجهیزات خانگی، اتومبیل و فضاپیماها قابلیت اطمینان بسیار

^۱ DOD

^۲ MIL - STD

^۳ Japanese Quality Revolution

^۴ J. R. Juran

^۵ W. Edwards

^۶ TQM

بالا‌تری نسبت به سیستم‌های مشابه نسبت به ۲۰ یا ۳۰ سال قبل دارند. این توسعه مدیون اصول مدیریت کیفیت جامع و بهبود پیوسته است به گونه‌ای که بسیاری از روش‌های قبلی استاندارد سازی در آمریکا کاملاً کاربرد خود را از دست داده‌اند (Conner, 2003).

بخش دیگری از قابلیت اطمینان که امروزه بسیار مورد توجه واقع شده است جنبه آماری دارد. زمانی می‌توان قابلیت اطمینان را به صورت احتمال بیان کرد که تأثیرپذیر از متغیرها باشد. از طرفی کلیه متغیرها در مهندسی جنبه غیر قطعی داشته و روش قطعی و کمی در این زمینه نامناسب و گمراه کننده خواهند بود.

در صنایع معدنی نیاز به بهبود قابلیت اطمینان وسایل معدنی، تعمیر و نگهداری و ایمنی را می‌توان در تاریخ معدنکاری یافت. تاریخ معدن کاری به مصر قدیم در معادن مرمر سبز در وادی^۱ در شبه جزیره سینا^۲ باز می‌گردد. امروزه میلیون‌ها نفر در صنایع معدنی در سراسر جهان مشغول به کار هستند. در طول سال‌ها، میلیاردها دلار صرف تولید انواع تجهیزات برای استفاده در صنایع معدنی در جهان می‌شود، و این مخارج به صورت صعودی در حال افزایش است.

امروزه رقابت جهانی صنایع معدنی را مجبور به مکانیزه کردن عملیاتشان توسط افزایش ماشینی کردن، کنترل و هدایت دستگاه به طور خودکار می‌کند. بنابراین، تجهیزات معدنی پیچیده‌تر و مصنوعی‌تر شده و قیمت‌های آن افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش اهمیت قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری و ایمنی کاملاً مشهود است (Dhillon, 2008).

۱-۳- پیشینه مطالعات

اولین کاربرد قابلیت اطمینان به جنگ جهانی دوم برمی‌گردد. در طی جنگ آلمان‌ها برای بهبود شرایط عملیاتی موشک‌های خود از مفاهیم قابلیت اطمینان استفاده کردند. پس از آن تاریخ، قابلیت

¹ Wady Mooghach

² Sinna Peninsula

اطمینان به سرعت در کارهای نظامی و سپس در سایر شاخه‌های مهندسی توسعه یافت (Dhillon, 2008) اولین کاربردهای قابلیت اطمینان در مهندسی معدن به اواخر دهه ۱۹۸۰ بر می‌گردد. این مطالعات به طور پیوسته از ۱۹۸۸ تا کنون ادامه داشته است. در ادامه این فصل تحقیقاتی که در زمینه قابلیت اطمینان در معادن انجام شده به طور اجمالی آورده شده است.

در سال ۱۹۸۸ کومار و گرانهولم^۱ برای اولین بار به طور جدی مفاهیم پایه، تکنیک‌های تحلیل قابلیت اطمینان و کاربردهای آن‌ها در مهندسی معدن را به طور عمومی مطرح نمودند. پس از آن کومار و همکارانش طی پنج سال با انتشار مقالات کاربردی در این حوزه، کاربرد قابلیت اطمینان را در حیطه ماشین‌آلات معدنی گسترش دادند (Kumar & Granholm, 1988)

استانک و ونکاتا^۲ در سال ۱۹۸۸، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده در طی ۱۰ سال در ۴ معدن زغال‌سنگ آمریکا، قابلیت اطمینان سیستم‌های برق دستگاه‌های مختلف برقی موجود در معادن را مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. در طی تحقیقات مزبور نرخ خرابی ۲۲ بخش یا قطعه برقی مختلف از جمله موتور دستگاه‌های نصب بولت، موتور ماشین‌های شاتل^۳، موتور ماشین‌های معدنکار پیوسته^۴، اجزای برقی سیستم قطع یا وصل تهویه و غیره را با استفاده از تکنیک‌های آماری تعیین نمودند. در مرحله دیگر تحقیق با استفاده از تکنیک تحلیل درخت خطا، احتمال به وجود آمدن ولتاژ خطرناک در سیستم‌های معدنی را به دست آوردند. آنها همچنین مطالعه خویش را به تعداد محدودی معدن غیر زغالی گسترش داده و با استفاده از تحلیل‌های اشاره شده در فوق، اعلام کردند که بحرانی‌ترین بخش برقی ماشین‌آلات معدنی، کابل اتصال آنها به زمین است (Stank & Venkata, 1988).

¹Kumar & Granholm

²Stank & Venkata

³Shuttle Car

⁴Continuous Miner

گودمن در سال ۱۹۸۸، با توجه به حساسیت صنایع و دولت آمریکا نسبت به آتش سوزی‌ها و انفجارات مرگبار در معادن زغال‌سنگ آمریکا، قابلیت اطمینان راه‌های فرار در معادن زغال‌اتاق و پایه آمریکا را با استفاده از تکنیک آنالیز درخت خطا مورد تحلیل قرار داد. وی با استفاده از درخت پیشنهادی خویش، دلایل و عوامل کاهش ایمنی در معادن زغال‌سنگ آمریکا را ارائه کرد (Goodman, 1988).

موخوپادیای^۱ در سال ۱۹۸۸، برای اولین بار مجموعه عملیات استخراج در معادن روباز را به عنوان یک سیستم در نظر گرفت. وی به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان، معادن روباز را از نظر تولید به دو دسته کلی معدن با یک محل استخراج و معدن با محل‌های استخراج متعدد تقسیم‌بندی نمود. در این تحقیق سیستم تولید در معدن شامل چهار زیر سیستم در نظر گرفته شده است: (۱) زیر سیستم بارگیری (قابلیت اطمینان شاول)، (۲) زیر سیستم‌های باربری (قابلیت اطمینان کامیون)، (۳) محل استخراج (قابلیت اطمینان سینه کار) و (۴) مقصد بار (دمپ باطله یا کارخانه فرآوری). اگر معدن تنها از یک محل استخراج شود، کلیه زیر سیستم‌های فوق به صورت سری عمل می‌کنند و در صورت خرابی هر کدام از بخش‌های بالا، تولید معدن متوقف خواهد شد. اما اگر معدن نقاط استخراج متعدد داشته باشد (چندین شاول در معدن باشد)، سیستم استخراج معدن موازی در نظر گرفته می‌شود. وی با در نظر گرفتن نرخ خرابی ثابت برای کلیه زیر سیستم‌های فوق، قابلیت اطمینان و میانگین زمان بین خرابی‌های معدن را در دو حالت ذکر شده محاسبه نمود (Mukhopadhyey, 1988).

دی^۲ و همکارانش در سال ۱۹۹۴ قابلیت اطمینان لاستیک کامیون‌های معدنی را مورد مطالعه قرار دادند (Dey et al., 1994). نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که تابع چگالی زمان‌های خرابی لاستیک از توزیع نرمال تبعیت می‌کند و بنابراین میزان ثابتی نیست. در این مطالعه کم‌باد بودن، پرباد بودن،

^۱ Mukhopadhyey

^۲ Dey

فشرده شدن لاستیک، گرم شدن، سرعت و طول مسیر باربری پارامترهایی هستند که عمر مفید لاستیک کامیون‌های معدنی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ایشان اعلام کردند سرعت بیش از ۳۰ کیلومتر بر ساعت و مسافت حمل بیش از ۵ کیلومتر، قابلیت اطمینان و عمر مفید لاستیک را کاهش می‌دهد.

در سال ۱۹۹۶ مندل و بانیک^۱ میزان تولید از دست رفته (ریسک تولید) و نیز دسترسی کارگاه‌های استخراج و نیز ماشین آلات موجود در شش کارگاه واقع در چهار معدن جبهه کار طولانی کشور هند را مورد مطالعه قرار دادند (Mandal & Banik, 1994). در این بررسی شیرر یا رنده، ناو زنجیری، بارگیر مرحله‌ای^۲، نوار نقاله‌ها، شرایط زمین‌شناسی و نیز نگهداری قدرتی به عنوان زیرسیستم‌های اصلی کارگاه‌های استخراج در نظر گرفته شدند. این محققان با انجام مطالعات آماری، احتمال توقف تولید مربوط به هر یک از ماشین آلات مذکور را به دست آوردند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که در ۳ کارگاه از ۶ کارگاه مورد مطالعه، شیرر، بیشترین میزان تأخیر را در تولید ایجاد نموده و در ۳ کارگاه دیگر ناو زنجیری بحرانی‌ترین زیر سیستم از نظر تأخیر تولید بوده است. در این تحقیق، گرچه مطالعه بسیار خوبی بر روی آمار خرابی و تأخیرات به وجود آمده انجام شده است، با این حال هیچ‌گونه مدل قابلیت اطمینان برای دستگاه‌های مورد اشاره ارائه نشده است.

سامانتا^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۱، با تأکید بر اهمیت شاول در عملیات استخراج معادن روباز، خرابی‌ها و عوامل توقف تولید مربوط به شاول را با استفاده از تکنیک درخت خطا تحلیل نمودند (Samanta et al., 2001). طبق این تحقیق، شاول به ۶ زیر سیستم شامل: باکت (جام)، سیستم حرکت، هیدرولیک، کابل‌ها، بدنه و کابین اپراتور تقسیم شده است. خرابی‌های هر یک از این بخش‌ها باعث توقف تولید شاول می‌شود. خرابی موتور می‌تواند ناشی از خرابی بخش‌های ساکن و یا قطعات

¹Mandal & Banik

² Stage loader

³ Samanta

در حرکت شاول باشد. با ادامه روند تجزیه ماشین، تا عوامل انتهایی شاخه‌ها ادامه پیدا می‌کند. وقوع هر یک از عوامل نهایی باعث وقوع خرابی در کار شاول می‌شود. سامانتا و همکارانش در یکی از معادن زغال‌سنگ هند، احتمال بروز هر یک از عوامل خرابی را تعیین کرده و در نتیجه احتمال خرابی در شاول را که به عنوان رخداد بالا در درخت ارائه شده است را تعیین نمودند.

هال و دانشمند^۱ در سال ۲۰۰۳ با انجام دو تحقیق مجزا در معدن روباز و زیرزمینی آمریکا و شیلی، تحقیقات در زمینه قابلیت اطمینان ماشین‌آلات معدنی در سال‌های اخیر را به سمت مدل‌سازی سوق دادند. در اولین تحقیق که در معادن روباز آمریکا انجام شده است، آنها منابع و روش‌های جمع‌آوری داده‌های مربوط به ماشین‌آلات معدنی و منابع اطلاعاتی ممکن را به شرح زیر پیشنهاد نموده‌اند (Hall & Daneshmend, 2003).

۱. حسگرهای نصب شده روی دستگاه‌ها

۲. اطلاعات ثبت شده توسط اپراتور

۳. سیستم‌های گسیل^۲ ناوگان ترابری

۴. گزارش‌ها تولید

۵. گزارش‌های واحد تعمیر و نگهداری

در ادامه تحقیق با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از منابع مختلف مورد اشاره در یکی از معادن آمریکا، مدل قابلیت اطمینان برای ۵ دستگاه شاول هیدرولیکی فعال در آن معدن را ارائه نمودند. نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده بر روی شاول‌های مذکور نشان داد که توزیع چگالی زمان‌های بین خرابی شاول‌ها همگی از نوع ویبل^۳ بوده و تنها پارامترهای مقیاس (λ) و پارامتر شکل

^۱ Hall & Daneshmend

^۲ Sensors

^۳ Weibull

(β) توزیع‌ها با یکدیگر تفاوت داشتند. همچنین تابع چگالی زمان‌های از دست رفته و توقف‌های تولید مربوط به همه دستگاه‌ها از نوع لاگ‌نرمال با میانگین و واریانس‌های مختلف بودند.

در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۰۳ ارائه شده است، هال و دانشمند قابلیت اطمینان ماشین آلات سیار موجود در یک معدن زیرزمینی در کشور شیلی را مدل سازی نموده‌اند. برای این منظور از داده‌های تعمیر و نگهداری ۱۵ ماه معدن استفاده شده است. معدن مورد نظر دارای ۴ خاک انداز^۱ و ۱۱ کامیون بوده است. در تحلیل‌های آماری و مدل سازی، برای کامیون‌ها سه زیر سیستم، موتور، بخش‌های حرکتی و هیدرولیک در نظر گرفته شده و بهترین توزیع مرتبط با هر کدام به دست آمده است. در نهایت با در نظر گرفتن شبکه سری بین کلیه اجزا، مدل قابلیت اطمینان برای هر کامیون ارائه شده است (Hall & Daneshmend, 2003).

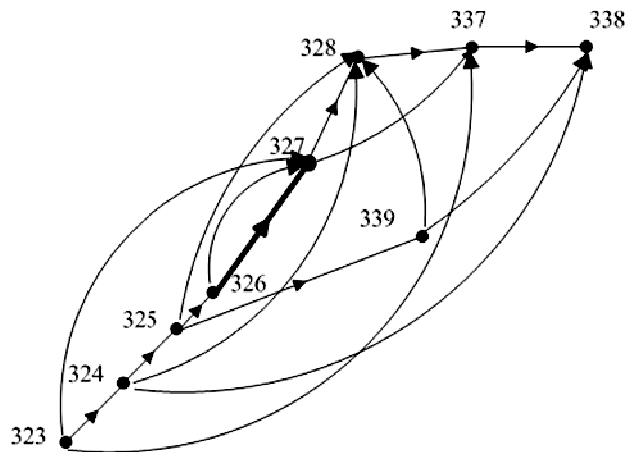
در سال ۲۰۰۵ کومرال^۲ با تکیه بر مفهوم قابلیت اطمینان سیستم تولید یک معدن زیرزمینی را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی نمود. وی برای این منظور، عملیات استخراج در معادن زیرزمینی را شامل پنج زیر سیستم، حفاری، آشکاری، بارگیری، باربری و تهویه در نظر گرفت. سپس با استفاده از آمار خرابی‌ها و توقف‌های سالانه زیرسیستم‌های فوق، قابلیت اطمینان آن‌ها را تعیین نمود. در ادامه برای دسترسی به کمترین هزینه استخراج با بیشترین قابلیت اطمینان تولید، معادله هدف بهینه‌سازی را تشکیل داده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مسأله مذکور را حل نمود (Kumral, 2005).

در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۰۸ به چاپ رسیده است، مربوط به قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه در معادن است. دنق‌پنگ^۳ و همکارانش، شبکه تهویه یک معدن زغال‌سنگ را به صورت گراف شکل ۱-۱ نشان داده است.

¹ Scoop

² Kumral

³ Dongpeng



شکل ۱-۱- شبکه گرافی معدن زغال سنگ (Dongpeng et al., 2008).

اصول به کار برده در این تحقیق مشابه اصول روش درخت معایب بوده و برای محاسبه قابلیت اطمینان شبکه با فرض مشخص بودن قابلیت اطمینان هر شاخه از جبر بول استفاده شده است (Dongpeng et al., 2008).

۴-۱- تعاریف و اصول موضوعه

قابلیت اطمینان یک سیستم عبارت است از احتمال عملکرد رضایت بخش آن سیستم تحت شرایط کار مشخص برای مدت زمان معین. این تعریف شامل چهار بخش اصلی است: احتمال، عملکرد رضایت بخش، زمان و شرایط کار معین. اولین بخش؛ احتمال با یک عدد بیان می شود که همان شاخص ارزیابی قابلیت اطمینان است. در بسیاری از موارد این شاخص مهمترین شاخص به شمار می آید اگر چه پارامترهای عدیده ای و رای آن مطرح است. سه بخش دیگر شامل عملکرد رضایت بخش، زمان و شرایط کار معین که همگی پارامترهای مهندسی هستند، و تئوری احتمال در این موارد هیچ کمکی نمی کند. فقط مهندسین و متخصصین قادر به تأمین اطلاعات مربوط به عملکرد رضایت بخش می باشند. زمان ممکن است به صورت ممتد و یا منقطع مطرح باشد و شرایط کار ممکن است کاملاً یکنواخت و یا به شدت در تغییر باشد. سایر تعاریف ارائه شده برای قابلیت اطمینان

سیستم‌ها، معیارهای عملکرد رضایت‌بخش و شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان در این بخش توضیح داده شده است.

۱-۴-۱- قابلیت اطمینان

تعریف قابل قبولی که از قابلیت اطمینان به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته، توانایی یک بخش (برای مثال یک سیستم تولید) برای انجام دادن عملیاتی که به آن بخش تخصیص داده شده در دوره زمانی از پیش تعیین شده و یا یک چرخه است. این توانایی را می‌توان هم به صورت احتمالاتی و هم به صورت قطعی معرفی کرد (Modarres et al., 1999).

در روش قطعی به این سؤالات پاسخ داده می‌شود که چرا و چگونه شکست روی داده است و چگونه می‌توان بر اساس رویدادهای اتفاق افتاده، رویدادهای مجدد را طراحی و آزمایش کرد تا از شکست‌های بعدی جلوگیری شود. این روش شامل آنالیزهای قطعی و مرور گزارش‌های مربوط به شکست، شناخت شرایط فیزیکی شکست، نقش و درجه آزمایش، بازرسی و تشکیل طرح‌های مجدد و یا باز شناختی شرایط است.

قابلیت اطمینان از جنبه احتمالاتی به صورت رابطه (۱-۱) تعریف شده است.

$$R(t) = P_r(T \geq t \mid C_1, C_2, \dots) \quad (1-1)$$

که در آن:

t: دوره زمانی مشخص یا چرخه‌های در نظر گرفته شده به منظور انجام عملیات یک بخش

T: زمان شکست یا چرخه شکست بخش

R(t): قابلیت اطمینان بخش

$C_1, C_2, \dots$ پارامترهای وابسته، مثل شرایط محیطی

اغلب در عمل، $C_1, C_2, \dots$ و ... در آنالیز احتمال قابلیت اطمینان به صورت مجازی در نظر گرفته

می‌شوند، با این فرض رابطه (۱-۱) به صورت رابطه (۲-۱) خلاصه می‌گردد.

$$R(t) = P_r(T \geq t) \quad (2-1)$$

قابلیت اطمینان نسبی (احتمالاتی) شاخصی خواهد بود تا با اطمینان معینی از نا اطمینانی‌های آینده برای حصول قابلیت اطمینان مطلق بحث شود. بدین وسیله با اعمال تغییراتی در مشخصات یک طرح یا سیستم، تغییرات قابلیت اطمینان نیز به طور نسبی سنجش پذیر می‌شود (Billinton & Allan, 1992).

نوع پیش‌بینی قابلیت اطمینان بستگی به شاخص‌های اطلاعاتی مورد نیاز دارد. روش‌های پیش‌بینی، اطلاعاتی در خصوص عملکردهای آینده سیستم در اختیار می‌گذارد. آینده نیز زمانی است وابسته به نوع سیستم و ممکن است کسری از ثانیه برای عملکرد یک موشک زمین به هوا و یا چند دهه مانند آنچه برای عملکرد نیروگاه‌های برق مطرح است، باشد. عملکرد یک سیستم در هیچ موردی به صورت قطعی قابل تعریف نیست و دارای طبیعت اتفاقی بوده و به صورت اتفاقی در تغییر است. ارزیابی فرایندهای اتفاقی صرفاً با شیوه‌های احتمالات میسر است.

تئوری احتمالات به تنهایی قادر به پیش‌بینی قابلیت اطمینان و یا ایمنی یک سیستم نیست و باید درک کاملی از سیستم، طرح آن، طریقه عمل و از کار افتادن آن، محیط عمل و تنش‌هایی که تحت آن شرایط واقع می‌شود در اختیار داشت. بنابراین تئوری احتمالات فقط ابزاری است تا بوسیله آن اطلاعات یک سیستم را تبدیل به پیش‌بینی عملکرد احتمالی نمود.

تعیین معیار عملکرد رضایت‌بخش خود یک مسئله مهندسی است. از کار افتادگی در یک سیستم ممکن است به شکل‌های مختلف اتفاق افتد و آن مشتمل است بر:

۱. از کار افتادگی فاجعه‌آمیز
۲. از کار افتادگی عمده
۳. تنزل مشخصات از یک حدود معین (به عنوان مثال خروجی یک پمپ مکانیکی ممکن است از یک حداقل مجاز کمتر شود در حالی که هنوز همچنان در حال کار باقی باشد).

شاخص کلاسیک قابلیت اطمینان، همان‌گونه که ذکر شد احتمال وقوع از کار افتادگی است ولی شاخص‌های متعدد دیگری نیز امروزه برای این منظور به کار می‌رود که بستگی به نوع سیستم و الزامات عمل آنها دارد. بنابراین قابلیت اطمینان به عنوان نام عمومی^۱ برای بسیاری از این شاخص‌هایی است که به عنوان مثال مواردی از آن نام برده شده است.

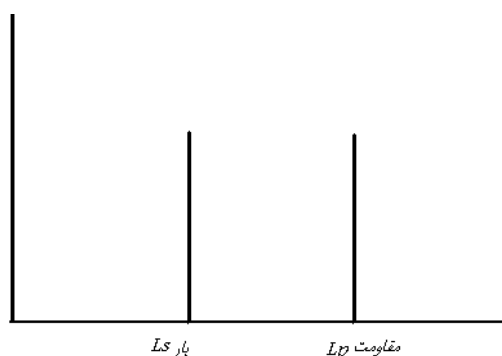
۱. تعداد انتظار از کار افتادگی در یک محدوده زمان معین

۲. میانگین زمان بین از کار افتادگی‌ها^۲

۳. کاهش انتظاری در خروجی سیستم ناشی از انواع از کار افتادگی‌ها

این شاخص‌ها هر یک با استفاده از تئوری مربوطه از بحث قابلیت اطمینان ارزیابی پذیر می‌باشند و انتخاب آن‌ها بستگی به نوع مسأله خواهد داشت.

پارامترهای مسایل چه از نوع قطعی باشد و یا از نوع غیر قطعی (احتمالی)، حدود مشخصی را برای کاربرد تعیین خواهد کرد. به عنوان مثال حد معینی برای یک مشخصه عملکرد معرفی می‌شود. مطابق شکل ۱-۲ گفته می‌شود مشخصه عملکرد L_p محدود به یک حد بالائی L_s است در صورتی که نامعادله $L_p < L_s$ برقرار باشد آنگاه سیستم دارای ایمنی خواهد بود.



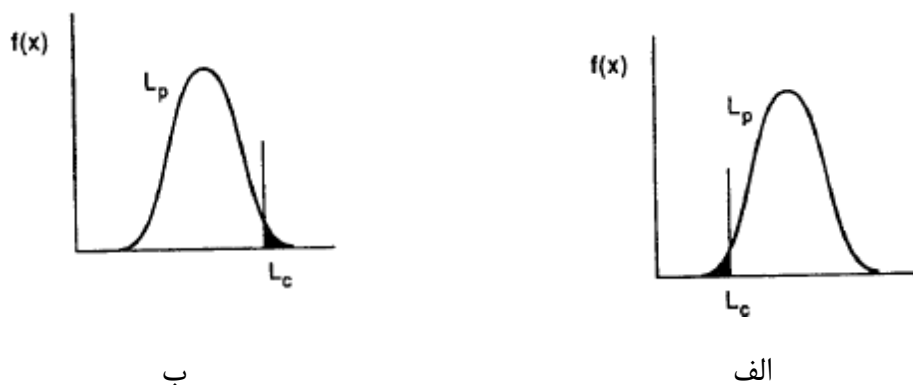
شکل ۱-۲- مقادیر قطعی بار و مقاومت (Billinton & Allan, 1992)

^۱ Generic Name

^۲ Mean Time Between Failure

البته این روش بسیار ساده انگارانه است زیرا طبیعت بارگذاری و مقاومت هر دو همراه با تغییرات است و از این رو است که برای تحلیل مسایل از ضریب اطمینان استفاده می‌شود، بدین مفهوم که همواره مقاومت " x " برابر یا بزرگتر از بارگذاری در نظر گرفته می‌شود تا عملاً سیستم همواره کفایت مورد انتظار را داشته باشد. یعنی مطابق شکل، همواره مشخصه عملکرد و سطح قابل قبول آن با یک فاصله^۱ معین جدا نگه داشته می‌شود. با این روش البته علی‌رغم ماهیت متغیر و تغییرپذیر، احتمال تغییرات ملحوظ نمی‌گردد و بنابراین با ضریب اطمینانی که به کار می‌رود ممکن است به علت تغییرپذیری و پراکندگی کم برای این دو مشخصه، ایمنی بیش از حد و غیر اقتصادی برای سیستم نتیجه شود و بالعکس ممکن است به علت تغییرپذیری زیاد ایمنی سیستم ناکافی باشد.

در شکل ۳-۱ ملاحظه می‌شود که مشخصه عملکرد با تابع احتمال L_p بیان شده و حد ثابت L_c نیز در آن نمایش داده شده است. محدوده مشکل آفرین مساحت زیر منحنی است و می‌تواند بر حسب نوع مسأله در سمت چپ و یا سمت راست حد مقرر شده قرار داشته باشد (L_p در این مسأله می‌تواند مبین بارگذاری و در مسأله‌ای تأمین پتانسیل الکتریکی باشد).

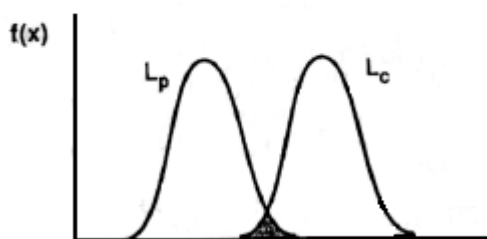


شکل ۳-۱- مقدار احتمالی L_p همراه با مقدار قطعی L_c (Billinton & Allan, 1992)

¹ Margin

روش ارائه شده با شکل ۱-۲ زمانی مناسب است که یکی از دو پارامتر الزاماً با تابع احتمال بیان شوند. شکل ۱-۳ نشان می‌دهد که در مسأله‌ای که مقاومت مکانیکی یک قطعه تحت بارگذاری مطرح است چگونه باید بررسی انجام گیرد. بدیهی است که سیستم در ناحیه تلاقی منحنی‌ها ایمنی نداشته و عدم کفایت محرز است.

این محدوده با شیوه‌های علم احتمالات قابل ارزیابی و کمیت سنجی است. در هر یک از روش‌های فوق با ارزیابی احتمال، ناحیه عدم کفایت مورد کنترل قرار می‌گیرد تا از حدود معین و تجربه شده‌ای کمتر باشد. کاستن احتمال یا سوق دادن مساحت این ناحیه به مقدار صفر غیر ممکن است زیرا موجب هزینه‌های بسیار سرسام آور خواهد شد (Billinton & Allan, 1992).



شکل ۱-۴- مقادیر احتمالی L_p و L_c (Billinton & Allan, 1992)

۱-۴-۲- توابع کلی قابلیت اطمینان

روابط ارائه شده به منظور محاسبه قابلیت اطمینان شرایط خاصی را در بر نداشته بنابراین برای هر گونه توزیع احتمال مناسب، روابط زیر به منظور تحلیل قابلیت اطمینان قابل استفاده است. با تعریف N به عنوان تعداد عضوهای متناظری که مورد آزمون مشخص قرار می‌گیرد و همچنین:

$N_s(t)$: تعداد عضوهای سالم در مدت زمان t

$N_f(t)$: تعداد عضوهای معیوب شده در مدت زمان t

$$N_s(t) + N_f(t) = N \quad (۳-۱)$$

رابطه (۱-۴) برای محاسبه قابلیت اطمینان تا هر زمان معین t ارائه شده است.

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} = \frac{N_0 - N_f(t)}{N_0} = 1 - \frac{N_f(t)}{N_0} \quad (۴-۱)$$

به طور مشابه برای احتمال از کار افتادن رابطه (۵-۱) ارائه شده است.

$$Q'(t) = \frac{N_f}{N_0}$$

$$\frac{dR(t)}{dT} = \frac{-dQ'(t)}{dt} = -\frac{1}{N_0} \frac{dN_f(t)}{dt} \quad (۵-۱)$$

در شرایطی که $dt \rightarrow 0$ آنگاه رابطه (۶-۱) برقرار خواهد بود.

$$f(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dN_f(t)}{dt} \quad (۶-۱)$$

رابطه (۶-۱) مبین معادله آهنگ زمانی از کار افتادن $\lambda(t)$ است. بیشترین کاربرد را در ارزیابی قابلیت اطمینان تابع آهنگ وقوع خطر^۱، تابع آهنگ زمانی از کار افتادن^۲، تابع آهنگ زمانی تعمیر^۳ یا آهنگ ویژه از کار افتادن^۴ دارد. این تابع را با بیان ریاضی آهنگ گذرا^۵ با سهولت بیشتری برای مدلسازی در بررسی و توصیف از کار افتادن می توان به کار برد. از این رو نام گذاری آهنگ وقوع خطر^۶ مناسبتر می باشد و با نماد $\lambda(t)$ نمایش داده شده است. بنابراین آهنگ وقوع خطر مبین آهنگ وقوع از کار افتادن صرفاً بر مبنای تعداد از کار افتادگی در واحد زمان به دست نمی آید زیرا بستگی به بزرگی نمونه از نظر تعداد نیز دارد. به عنوان مثال تعداد از کار افتادگی در طی زمان معین در یک نمونه حاوی ۱۰۰ عضو مشابه کمتر نمونه ای با ۱۰۰۰ عدد از همان اعضا است. از طرف دیگر ممکن است تعداد از کار افتادگی در طی زمان معین برای نمونه های ۱۰۰ تایی و ۱۰۰۰ تایی به لحاظ تفاوت در شرایط کار این نمونه ها مقادیر یکسانی شود، که در این حالت آهنگ وقوع خطر برای نمونه کوچکتر بیشتر است. بنابراین آهنگ وقوع خطر به تعداد از کار افتادگی در یک دوره زمانی

¹ Hazard Rate Function

² Failure Rate Function

³ Repair Rate Function

⁴ Age Specific Failure rate

⁵ Transition Rate

⁶ Hazard Rate

معین و همچنین به تعداد عضوهای در معرض از کار افتادن بستگی خواهد داشت و با بیان ریاضی خواهیم داشت (Billinton & Allan, 1992):

$$\lambda(t) = \frac{\text{تعداد از کار افتادگی در واحد زمان}}{\text{تعداد عضوهای در معرض از کار افتادن}} \quad (7-1)$$

معادله (7-1) مبنای تعیین تابعهای قابلیت اطمینان است.

بنابراین توابع چگالی احتمال از کار افتادن و آهنگ وقوع خطر در لحظه $t = 0$ و فقط در این لحظه متناظر یکدیگر هستند، بیان ریاضی تابع آهنگ وقوع خطر در زیر آورده شده است:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{1}{N_s(t)} \cdot \frac{dN_f}{dt} \\ &= \frac{N_0}{N_0 N_s(t)} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt} = \frac{N_0}{N_s(t) N_0} \frac{dN_f(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} \cdot f(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (8-1)$$

بنابراین

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (9-1)$$

معادله آهنگ وقوع خطر در زمان $t = 0$ نشان می‌دهد، $\lambda(t) = f(0)$ چون $R(t) = 1$ و همچنین این معادله نشان می‌دهد که آهنگ بروز خطر یک تابع شرطی بر حسب تابع چگالی احتمال از کار افتادن و شرط آن تابع بقا می‌باشد. بیان فیزیکی رابطه فوق بدین مفهوم است که تابع چگالی احتمال از کار افتادن امکان تعیین احتمال از کار افتادن را در هر فاصله زمانی برای آینده فراهم می‌آورد در حالی که آهنگ وقوع خطر امکان این کار را برای فاصله زمانی بعدی مشروط بر عدم وقوع شکست تا زمان t فراهم می‌کند. بیان ریاضی تابع آهنگ وقوع خطر، معادل تابع چگالی احتمال از کار افتادن صرفاً محدود به زمان مورد نظر t است. از آنجائی که مساحت زیر منحنی تابع چگالی احتمال از کار افتادن کمتر از واحد است، این قسمت از تابع به عدد واحد باز گردانده شده و به اصطلاح نرمالیزه گردد. اینکار با تقسیم کردن تابع چگالی احتمال از کار افتادن به مساحت زیر این منحنی برای دوره زمانی پس از مقطع زمان مورد بررسی انجام می‌گیرد. یعنی:

برای زمان محدود به t

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (10-1)$$

بنابراین برای تعیین قابلیت اطمینان

$$\begin{aligned} \int_1^{R(t)} \frac{1}{R(t)} dR(t) &= \int_0^t -\lambda(t) dt \\ \ln R(t) &= \int_0^t -\lambda(t) dt \\ R(t) &= \exp \left(- \int_0^t \lambda(t) dt \right) \end{aligned} \quad (11-1)$$

و در شرایط ویژه‌ای که λ مستقل از زمان و مقداری ثابت باشد:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (12-1)$$

این شکل از تابع به نام توزیع نمایی شناخته می‌شود.

۱-۴-۳- شکل توابع قابلیت اطمینان

برای بسیاری از عضوهای فیزیکی شکل منحنی آهنگ وقوع خطر تقریباً صادق است. این شکل در شباهت با وان حمام^۱ با همین نام قابل تقسیم به سه ناحیه است. ناحیه I با نام‌های مختلفی چون، مرگ و میر نوزادی و یا مرحله وقوع اشکالات اولیه^۲ شناخته شده و علت آن می‌تواند خطاهای ساخت و یا طراحی نامناسب باشد. در این ناحیه آهنگ وقوع خطر به عنوان تابعی از زمان روند نزولی دارد. ناحیه II با نام‌های دوره عمر مفید^۳ و یا مرحله عملکرد عادی^۴ شناخته شده و ویژگی آن ثابت ماندن آهنگ وقوع خطر می‌باشد. وقوع شکست در این ناحیه صرفاً تصادفی است. این تنها ناحیه‌ای است که از توزیع نمایی برای ارزیابی قابلیت اطمینان می‌توان استفاده کرد.

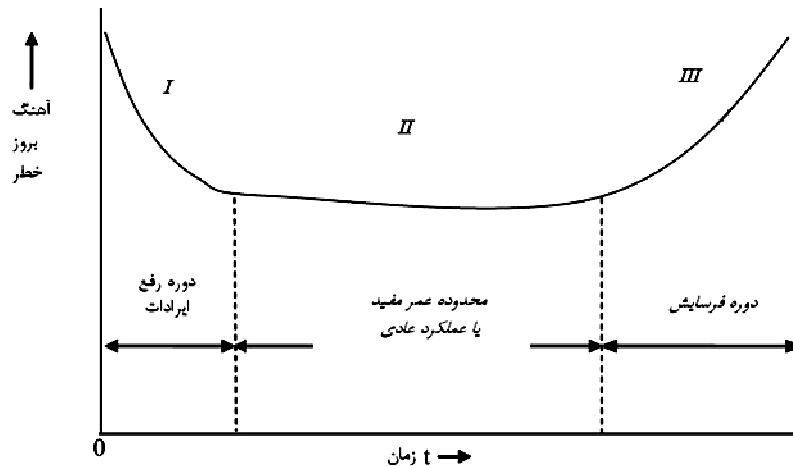
¹ Bathtub curve

² Debugging phase

³ Useful life period

⁴ Normal operating phase

ناحیه III با نام‌های مرحله فرسایش و یا خستگی^۱ شناخته شده و مشخصه‌ی آن روند شدید افزایشی آهنگ وقوع خطر بر حسب زمان می‌باشد. این سه مرحله در شکل ۵-۱ در ارائه تابع چگالی احتمال از کار افتادن به وضوح نمایان است. ناحیه II با تقریب خوبی از منحنی نمایی با توان منفی پیروی می‌کند که به صورت خط چین، نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱- نمونه‌ای از تغییرات آهنگ وقوع خطر بر حسب سن کارکرد برای قطعات الکترونیکی (Billinton & Allan, 1992)

در اوایل عمر سیستم (بازه شروع کار)، ابعاد فنی و مشخصات عملیاتی بخش‌های مختلف سیستم برای اپراتور به طور کامل مشخص نبوده و رفتار سیستم تا حدودی برای کاربر ناشناخته است. این امر در اوایل عمر سیستم باعث بروز خرابی‌ها و توقف‌هایی در تولید می‌شود. همچنین کنترل کیفیت ضعیف، مواد و لوازم یدکی غیر استاندارد، نقاط ضعف موجود در ساخت یک سیستم، رفع نقص و تعمیر نامناسب و خطاهای انسانی از جمله دلایل دیگر بالا بودن نرخ خرابی در اوایل عمر سیستم می‌باشد (Dhillon, 2008).

مدتی پس از شروع و راه اندازی دستگاه، نرخ خرابی با گذشت زمان کمتر می‌شود. در اواسط عمر دستگاه با توجه به شناخت کافی کاربر از دستگاه و همچنین برنامه‌ریزی صحیح برای تعمیر و

¹ Wear out or fatigue phase

نگهداری، دستگاه از نظر خرابی به پایداری نسبی رسیده و نرخ خرابی در بازه زمانی کار مفید تقریباً ثابت می‌ماند. با نزدیک شدن به انتهای عمر دستگاه، کلیه بخش‌های دستگاه دچار فرسودگی و کاهش کیفیت می‌شوند. در نتیجه قطعات دستگاه دچار خرابی‌های غیر ملموس شده و قطعات تحت سرعت و تنش‌های بالاتر از توان قرار می‌گیرند و با گذشت زمان نرخ خرابی دستگاه افزایش می‌یابد.

۱-۴-۴- پایداری

پایداری^۱ از مهمترین مشخصه‌ها و ملزومات در سیستم‌های دینامیکی است. برای پایداری تعاریف مختلفی وجود دارد. در تعریف پایداری بر مبنای ورودی و خروجی، سیستمی پایدار^۲ است که به ازای هر ورودی محدود^۳ و خروجی محدود^۴ نتیجه دهد.

به عبارت دیگر سیستم BIBO^۵ باشد. این تعریف کاملاً نظری است بدین معنی که چنانچه خروجی یک سیستم به ازای هر ورودی محدود در هیچ لحظه‌ای بی‌نهایت نشود سیستم پایدار است. با این تعریف هیچ سیستم فیزیکی نمی‌توان یافت که ناپایدار باشد زیرا هیچ پدیده فیزیکی وجود ندارد که به بی‌نهایت برسد. ولی باید به این نکته توجه کرد که بی‌نهایت فیزیکی با بی‌نهایت نظری کاملاً متفاوت است (کراری، ۱۳۸۲).

برای مثال در مورد سیستم‌های قدرت در مبحث دینامیک و کنترل سیستم‌های قدرت سیستم پایدار است که بتواند پس از بروز اختلال به وضع عادی و پایدار باز گردد. به عبارت ساده‌تر هم زمانی حفظ شود. به همین ترتیب می‌توان گفت، سیستمی ناپایدار است که نتواند پس از بروز اختلال در سیستم، به وضع عادی و پایدار خود باز گردد به عبارت ساده‌تر همزمانی از دست خواهد رفت.

^۱ Stability

^۲ Stable

^۳ Bounded input

^۴ Bounded output

^۵ Bounded input, Bounded output

مفهوم پایداری برای کلیه شبکه‌ها کاربرد دارد. مفهوم پایداری را زمانی می‌توان به صورت یک کمیت معرفی نمود که عوامل ایجاد ناپایداری به صورت تابعی از زمان معرفی شده باشند. مفهوم پایداری برای شبکه‌های تهویه نیز صادق است. از آنجایی که عوامل ایجاد ناپایداری در شبکه‌های تهویه ماهیت آماری داشته و تابع وابسته به زمان آنها معرفی نشده است، کمیت پایداری برای شبکه‌های تهویه قابل محاسبه نمی‌باشد.

مفهوم و پارامترهای تعیین کننده پایداری در شبکه‌های تهویه بسته به نوع و مأموریت شاخه‌های مختلف متفاوت هستند. در تهویه معادن زغال سنگ همواره هوا رسانی به کارگاه‌های استخراج از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. بنابراین در شاخه‌های شامل کارگاه‌های استخراج، شدت جریان جهت ترقیق گازهای حاصل از استخراج زغال پارامتر تعیین کننده پایداری است. در سایر شاخه‌ها که به عنوان واسطه عبور هوا در کل شبکه هستند، شدت جریان جهت ترقیق گازهای حاصل از استخراج زغال اهمیت چندانی برخوردار نبوده و پارامتر تعیین کننده پایداری هر یک از این شاخه‌ها سرعت مجاز عبور هوا می‌باشد.

فصل دوم

روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان

۲-۱- مقدمه

در طی سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی و دستگاه‌ها ارائه شده است. هر یک از این روش‌ها در صورت توسعه به یک تکنیک توانمند در سایر شاخه‌های علوم به ویژه مهندسی صنایع و مدیریت تبدیل شده‌اند. در این فصل روش‌های تحلیل و بررسی قابلیت اطمینان ارائه شده است.

۲-۲- ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها بر مبنای روش‌های تحلیلی

در تحلیل قابلیت اطمینان هر سیستم یا دستگاه، اطلاع دقیق از ساختار عملیاتی و طراحی آن سیستم یا دستگاه الزامی است. بررسی ساختار دستگاه به منظور ارزیابی ارتباطات داخلی اجزای مختلف دستگاه و تأثیر آن‌ها بر عملکرد کلی دستگاه صورت می‌گیرد. عملکرد دستگاه نیز مستقیماً به قابلیت اطمینان بخش‌های مختلف آن بستگی دارد.

در مهندسی قابلیت اطمینان هر یک از بخش‌های دستگاه یا سیستم را که عمل مشخص و قابل ملاحظه‌ای انجام می‌دهند زیر سیستم^۱ می‌نامند. نحوه آرایش زیر سیستم‌های هر دستگاه از نظر عملکرد و نیز قابلیت اطمینان بسیار مهم است. بنابراین در تحلیل و مدل‌سازی قابلیت اطمینان هر

^۱ Subsystem

دستگاه ابتدا باید تمامی زیر سیستم‌های مهم و حیاتی دستگاه شناسایی شده و ارتباط داخلی این بخش‌ها تعیین شوند.

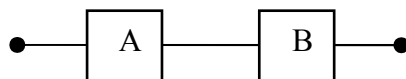
شبکه‌ها ممکن است ساده تا فوق العاده پیچیده باشند اما در مجموع پنج آرایش عمده در تحلیل‌های قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Dhillon, 2008). در ادامه انواع این آرایش‌ها و محاسبات ریاضی مربوط به هر کدام از آن‌ها معرفی شده است.

۲-۲-۱- مدل سازی شبکه و ارزیابی سیستم‌های ساده

قبل از کاربرد شیوه‌های تحلیل شبکه‌ها برای ارزیابی قابلیت اطمینان باید درک کاملی از روابط میان سیستم‌ها و مدل سازی شبکه حاصل شود. به همین دلیل برای یک تحلیل گر قابلیت اطمینان باید درک کاملی از عملکردها و الزامات یک سیستم وجود داشته باشد تا امکان بررسی‌های کمی برای وی فراهم شود (Billinton & Allan, 1992).

۲-۲-۱-۱- مدل سازی سیستم‌های با شبکه سری

سیستم متشکل از عضوهای مستقل A و B با اتصال سری از دیدگاه قابلیت اطمینان در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. ترتیب ارائه شده نمایانگر ضرورت عملکرد صحیح هر دو برای حصول عملکرد صحیح سیستم است (Billinton & Allan, 1992).



شکل ۲-۱- سیستم با دو عضو سری

در صورتی که R_A و R_B احتمال عملکرد صحیح و Q_A و Q_B احتمال از کار افتادن این اعضا باشد از آنجایی که موفقیت و شکست، پدیده‌های دو به دو ناسازگار و مکمل است، بنابراین:

$$R_A + Q_A = 1 \quad \text{و} \quad R_B + Q_B = 1$$

با کاربرد قواعد احتمال، احتمال عملکرد صحیح سیستم R_s و یا به عبارتی دیگر قابلیت اطمینان آن عبارت است از:

$$R_s = R_A \cdot R_B \quad (1-2)$$

و در صورتی که تعداد n عضو با شبکه سری مطرح باشد:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2-2)$$

این معادله با نام قاعده ضرب قابلیت اطمینان نیز شناخته می‌شود. در برخی از کاربردها ترجیحاً ارزیابی نا اطمینانی و یا به عبارتی احتمال از کار افتادن مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به این که موفقیت و شکست سیستم نیز دو حادثه مکمل است بنابراین برای احتمال از کار افتادن سیستم Q'_s داریم:

$$Q'_s = 1 - R_A \cdot R_B \quad (3-2)$$

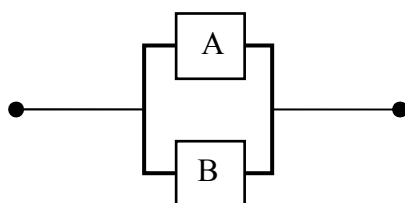
$$= 1 - (1 - Q'_A) \cdot (1 - Q'_B) = Q'_A + Q'_B - Q'_A \cdot Q'_B$$

و برای سیستم با شبکه سری شامل n عضو رابطه (۴-۲) ارائه شده است.

$$Q'_s = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \quad (4-2)$$

۲-۱-۲-۲- مدل سازی سیستم‌های با شبکه موازی

سیستمی متشکل از عضوهای مستقل A و B با اتصال موازی از دیدگاه تحلیل قابلیت اطمینان در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است. در این مورد برای حصول عملکرد صحیح سیستم کافی است فقط یکی از اعضا دارای عملکرد صحیح باشد (Billinton & Allan, 1992).



شکل ۲-۲- سیستم با دو عضو موازی

با کاربرد قاعده‌های احتمال، این دفعه احتمال عملکرد صحیح سیستم R_p را بر مبنای احتمال از کار افتادن اعضا با سهولت بیشتری می‌توان به دست آورد زیرا که از کار افتادن سیستم صرفاً در شرایط از کار افتادن همزمان اعضا ایجاد می‌شود.

$$R_p = 1 - Q'_A \cdot Q'_B \quad (5-2)$$

$$= 1 - (1 - R_A) \cdot (1 - R_B) = R_A + R_B - R_A \cdot R_B$$

و برای تعداد n عضو در تشکیل سیستم با شبکه موازی:

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n Q'_i \quad (6-2)$$

$$Q'_p = Q'_A \cdot Q'_B$$

$$Q'_p = \prod_{i=1}^n Q'_i \quad (7-2)$$

در مقایسه معادله‌ها برای سیستم‌های با شبکه سری و موازی تشابهی با جایگزینی R به جای Q مشاهده می‌شود. بر خلاف شبکه سری، قابلیت اطمینان در شبکه موازی با افزایش تعداد اعضا افزایش می‌یابد ولی باید توجه شود که افزایش تعداد اعضا با افزایش هزینه، وزن و حجم سیستم همراه است و عملیات نگهداری و پشتیبانی حجیم‌تری را طلب می‌کند. بنابراین افزایش تعداد اعضا در این موارد باید دقت کافی صورت گیرد.

۲-۲-۱-۳- مدل‌سازی سیستم‌های با شبکه سری- موازی

سیستم‌های با شبکه سری و با شبکه موازی در ترکیب با هم مبنای تحلیل سیستم‌هایی با شبکه پیچیده‌تر را فراهم می‌کند. روش کلی تحلیل سیستم‌های ترکیبی، کاستن تعداد اعضا سیستم با جایگزین کردن زیر سیستم‌های با شبکه سری و یا موازی با واحدهای منفرد معادل است. این روش به نام معادل‌سازی شناخته شده است، که در بخش‌های بعدی به آنها پرداخته شده است.

۲-۲-۱-۴-مدل سازی سیستم با آرایش k از m^۱

در این آرایش m زیرسیستم در حال فعالیت هستند و حداقل باید k تا زیرسیستم درست کار کنند تا دستگاه بتواند عملکرد مورد انتظار و مطلوبی داشته باشد. رابطه ریاضی مربوط به محاسبه قابلیت اطمینان این آرایش به شرح زیر است (Dhillon, 2008):

$$R_s = \sum_{j=k}^m \binom{m}{j} R^j (1-R)^{m-j} \quad (۸-۲)$$

که در آن:

R_s : قابلیت اطمینان سیستم

R_j : قابلیت اطمینان هر زیرسیستم

۲-۲-۲-مدل سازی شبکه و ارزیابی سیستم‌های پیچیده

شیوه‌های ارائه شده در بخش‌های قبلی به علت محدودیت سیستم‌ها به شبکه وابستگی سری یا موازی عضوها، کاربرد محدودی دارد. بسیاری از سیستم‌ها چنین ساختار ساده‌ای نداشته بلکه دارای منطق عملکرد پیچیده‌ای هستند بنابراین برای مدل‌سازی ارزیابی قابلیت اطمینان آنها شیوه‌های دیگری مورد نیاز است.

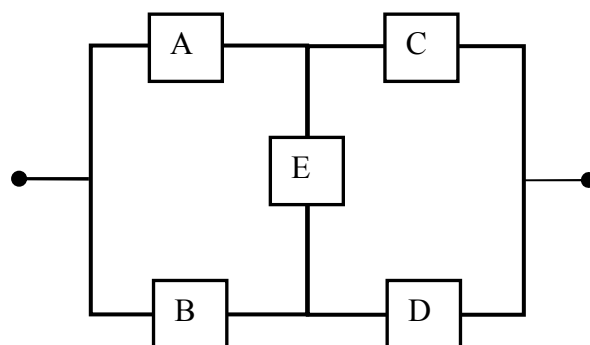
یکی از سیستم‌ها که فاقد ساختار سری یا موازی است در شکل ۲-۳ نشان داده شده است و اصطلاحاً سیستم با شبکه پل^۲ نامیده می‌شود. این نوع سیستم کاربرد بسیار متداولی در مهندسی داشته و از تحلیل آن مکرراً در ارائه شیوه‌های مناسب برای تحلیل سیستم‌های پیچیده^۳ استفاده شده

^۱ K- out- of- m

^۲ Birdge Type

^۳ Complex System

است. در یک بررسی عینی ملاحظه می‌شود که وابستگی در این سیستم از نوع سری یا موازی نیست. برای تحلیل این نوع سیستم‌ها تعدادی از شیوه‌های حل در زیر آورده شده است (Dhillon, 2008):



شکل ۲-۳- شبکه پل

۱. روش حل احتمال شرطی^۱

۲. تحلیل مجموعه‌های انقطاع و اتصال^۲

۳. استفاده از نمودارهای درخت^۳

۴. استفاده از نمودارهای منطقی^۴

۵. شیوه ماتریس اتصال^۵

اگر چه شیوه‌های دیگری نیز وجود دارد ولی از آنها کمتر استفاده می‌شود و شیوه‌های فوق برای حل همه مسائل مهندسی کافی شناخته شده است. در بسیاری از این شیوه‌های پیشرفته، منطق عملکردهای سیستم‌های پیچیده به ساختاری متشکل از شبکه با عضوهای سری و موازی تبدیل و تغییر شکل داده می‌شود و بنابراین مفاهیم مشابهی در آنها مطرح می‌باشد. بنابراین تفاوت عمده میان این شیوه‌ها در روش استدلال و نحوه ارائه است و نه در مفاهیم بنیادی آنها.

¹ Conditional Probability Approach

² Cut&Tie Set Analysis

³ Tree Diagrams

⁴ Logic Diagrams

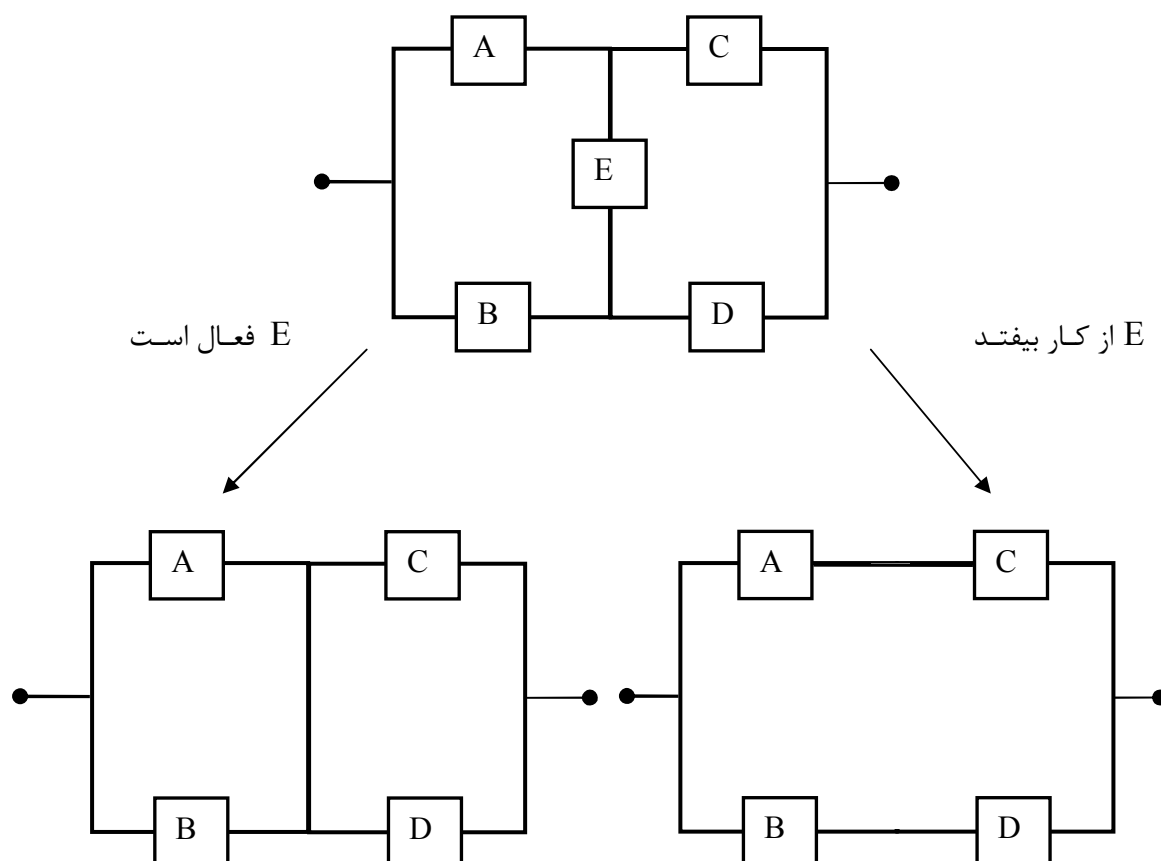
⁵ Connection Matrix Technique

۲-۲-۱- روش احتمال شرطی

یکی از روش‌های پردازش هر مسأله پیچیده، تجزیه و ساده سازی ساختار اولیه آن به شبکه‌های سری و موازی و سپس ترکیب این شبکه‌ها با استفاده از روش احتمال شرطی است (Dhillon, 2008).

$$P(\text{sys} \cdot S/F) = P(\text{sys} \cdot S/F | X_G) P(X_G) + P(\text{sys} \cdot S/F | X_B) P(X_B) \quad (9-2)$$

با در نظر گرفتن شکل ۲-۳ ملاحظه می‌شود که عملکرد صحیح سیستم مستلزم عملکرد صحیح اعضا در حداقل یکی از مسیرهای AC، BD، AED و یا BEC است. برای کاربرد روش احتمال شرطی در ابتدا باید عضو X از میان اعضا برای دو حالت خوب و بد انتخاب شود. البته برای این منظور هر یک از عضوهای سیستم ممکن است انتخاب شود ولی انتخابی مناسب‌تر است که موجب سهولت تحلیل شود. از این رو عضو E انتخاب می‌شود. تحت دو شرطی که این عضو دارای عملکرد صحیح باشد یا از کار بیفتد انشعاب‌های نشان داده شده در شکل ۲-۴ حاصل می‌شود. بدین ترتیب ساختار سری - موازی برای هر یک از شرایط نتیجه می‌شود. وقتی عضو E در شرایط مطلوب است A و B و همچنین C و D موازی و معادل آنها به صورت سری خواهد بود و زمانی که E از کار بیفتد A و C و همچنین B و D سری و معادل آنها موازی می‌شود.



شکل ۲-۴- زیر سیستم‌های شبکه پل (Billinton & Allan, 1992)

بدین ترتیب دو زیر سیستم از سیستم کلی حاصل می‌شود که در ضمن دو به دو ناسازگار نیز هستند. بنابراین آنها برای تحلیل عملکرد سیستم می‌توان از همان اصول قاعده احتمال شرطی استفاده کرد.

در حالت کلی:

$$R_S = R_S(if E_G).R_E + R_S(if E_B).Q'_S \quad \text{الف- با شرط سالم بودن و عملکرد عضو E}$$

$$R_S(if E_G) = (1 - Q'_A Q'_B) \cdot (1 - Q'_C Q'_D) \quad \text{ب- با شرط از کار افتادن عضو E}$$

$$R_S(if E_B) = 1 - (1 - Q'_A Q'_B) \cdot (1 - Q'_C Q'_D)$$

$$R_S = (1 - Q'_A Q'_B) \cdot (1 - Q'_C Q'_D) \cdot R_E + (1 - (1 - Q'_A Q'_B) \cdot (1 - Q'_C Q'_D)) \cdot Q'_S$$

$$R_S = R_A R_B + R_B R_D + R_A R_D R_E + R_B R_C R_E - R_A R_B R_C R_D - R_A R_C R_D R_E - R_A R_B R_C R_E - R_B R_C R_D R_E + 2 R_A R_B R_C R_D R_E$$

هر گاه احتمال ناکارآمدی همه شاخه‌ها با هم برابر باشد.

$$R_A = R_B = R_C = R_D = R$$

$$R_S = 2R^2 + 2R^3 - 5R^4 + 2R^5 \quad (2-10)$$

احتمال شرطی ابزار مفیدی در ارزیابی قابلیت اطمینان است اما به علت دشواری تدوین دستورالعمل عمومی برای کاربرد روش تجزیه سیستم به برنامه‌های رایانه‌ای کاربرد چندانی پیدا نکرده است.

۲-۲-۲-۲ روش مجموع انقطاع^۱

این روش بنا به دو دلیل عمده، یکی از مؤثرترین روش‌ها در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها شناخته شده است (Dhillon, 2008):

۱. کاربردپذیری در برنامه‌نویسی رایانه‌ای برای تحلیل مؤثر و سریع هر گونه شبکه برای

سیستم‌ها

۲. امکان‌پذیری شناسایی مستقیم طرق مختلف از کار افتادن سیستم

طبق تعریف مجموع انقطاع عبارت از مجموعه‌ای از عضوهای سیستم است که شکست آنها سبب

شکست سیستم می‌شود

با تحلیل نمودار شکل ۲-۳ با روش مجموع انقطاع جدول ۲-۱ بدست آمده است.

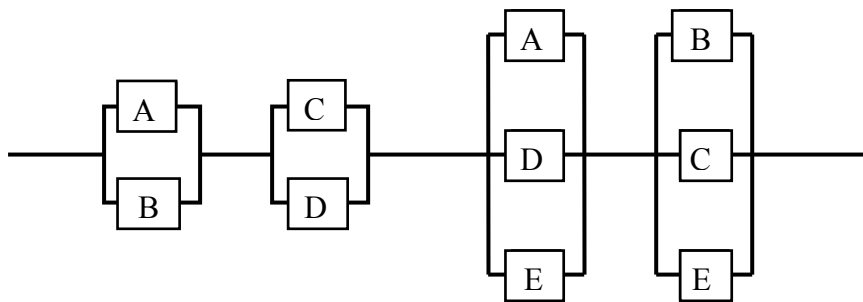
جدول ۲-۱- کوچکترین مجموعه‌های انقطاع شبکه پل

شماره کوچکترین مجموعه انقطاع	عضوهای هر مجموعه انقطاع
۱	AB
۲	CD
۳	AED
۴	BEC

¹ Cut Set Method

۲-۲-۲-۱- روش استفاده از مجموعه‌های انقطاع

به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان (یا نا اطمینانی) سیستم، مجموعه‌های کمترین عضوهایی که حالت‌های شکست سیستم را به وجود می‌آورند باید در ترکیب با یکدیگر در نظر گرفته شوند. طبق تعریف بدیهی است که همه‌ی عضوهای هر مجموعه انقطاع باید از کار بیفتد تا موجب شکست سیستم شود. بنابراین می‌توان اصول شبکه موازی را برای آنها به کار برد. همچنین با توجه به این که هر یک از مجموعه‌های انقطاع در عملکرد سیستم نقش اساسی داشته، اصول شبکه سری برای مجموعه‌های انقطاع در عملکرد سیستم حاکم خواهد بود. با تلفیق این اصول و بر مبنای جدول ۱-۲ نموداری مطابق شکل ۲-۵ حاصل می‌شود.



شکل ۲-۵- کوچکترین مجموعه‌های انقطاع شبکه پل (Billinton & Allan, 1992)

مفهوم اجتماع برای مجموعه‌های شکست C_i حاکم است و با نشان دادن احتمال وقوع هر مجموعه

انقطاع $P(C_i)$ در تعیین احتمال شکست سیستم خواهیم داشت (Billinton & Allan, 1992):

$$Q'_S = P(C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup \dots \cup C_i \cup \dots \cup C_n) \quad (2-11)$$

کاربرد روش مجموع انقطاع برای تحلیل شکل ۲-۳ به این صورت است.

$$\begin{aligned} Q'_S &= P(C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup C_4) \\ &= P(C_1) + P(C_2) + P(C_3) + P(C_4) - P(C_1 \cap C_2) - P(C_1 \cap C_3) - P(C_1 \cap C_4) - P(C_2 \\ &\quad \cap C_3) - P(C_2 \cap C_4) - P(C_3 \cap C_4) + P(C_1 \cap C_2 \cap C_3) + P(C_1 \cap C_2 \\ &\quad \cap C_4) + P(C_1 \cap C_3 \cap C_4) + P(C_2 \cap C_3 \cap C_4) - P(C_1 \\ &\quad \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4) \end{aligned}$$

که در آن:

$$P(C_1) = Q'_A \cdot Q'_B$$

$$P(C_2) = Q'_C \cdot Q'_D$$

$$P(C_3) = Q'_A \cdot Q'_D \cdot Q'_E$$

$$P(C_4) = Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_E$$

$$P(C_1 \cap C_2) = P(C_1) \cdot P(C_2) = Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D$$

$$P(C_1 \cap C_3) = P(C_1) \cdot P(C_3) = Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_E \cdot Q'_D$$

$$P(C_1 \cap C_4) = P(C_1) \cdot P(C_4) = Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_E$$

$$P(C_2 \cap C_3) = P(C_2) \cdot P(C_3) = Q'_A \cdot Q'_E \cdot Q'_C \cdot Q'_D$$

$$P(C_2 \cap C_4) = P(C_2) \cdot P(C_4) = Q'_E \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D$$

$$P(C_3 \cap C_4) = P(C_3) \cdot P(C_4) = Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D \cdot Q'_E$$

$$\begin{aligned} P(C_1 \cap C_2 \cap C_3) &= P(C_1 \cap C_2 \cap C_4) = P(C_1 \cap C_3 \cap C_4) = P(C_2 \cap C_3 \cap C_4) \\ &= P(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4) = Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D \cdot Q'_E \end{aligned}$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} Q'_S &= Q'_A \cdot Q'_B + Q'_C \cdot Q'_D + Q'_A \cdot Q'_D \cdot Q'_E + Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_E - Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D - \\ &Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_E \cdot Q'_D - Q'_A \cdot Q'_E \cdot Q'_C \cdot Q'_D - Q'_E \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D - Q'_E \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D - \\ &Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D \cdot Q'_E - Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D \cdot Q'_E + 2 Q'_A \cdot Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_D \cdot Q'_E \end{aligned}$$

$$Q'_A = Q'_B = Q'_C = Q'_D = Q'_E = Q'$$

$$Q'_S = 2Q'^2 + 2Q'^3 - 5Q'^4 + 2Q'^5$$

$$R_S = 1 - Q'_S$$

۲-۲-۲-۲-۲-۲ ارزیابی تقریبی

ارزیابی دقیق به روش محاسباتی ارائه شده در بخش قبل همواره از نظر تئوری میسر است ولی با بزرگ شدن سیستم کاری بسیار وقت گیر و خسته کننده می شود. برای رفع این مشکل روش های تقریبی به کار می رود، اگر چه قدری از میزان دقت می کاهد ولی ارزیابی را به مراتب سریعتر می کند. میزان عدم دقت، معمولاً ناچیز و در محدوده ای مجاز تغییرات اطلاعات مربوط به قابلیت اطمینان است. بویژه که قابلیت اطمینان عضوهای سیستم معمولاً از مقادیر بزرگی برخوردار است.

ارزیابی تقریبی به دو طریق میسر است اول، در محاسبه احتمال شکست از جمع احتمال مجموعه‌های انقطاع استفاده می‌شود:

$$Q'_s = P(C_1) + P(C_2) + \dots + P(C_i) + \dots + P(C_n) = \sum_{i=1}^n P(C_i) \quad (12-2)$$

و بنابراین برای شکل ۲-۳ خواهیم داشت:

$$Q'_s = Q'_A \cdot Q'_B + Q'_C \cdot Q'_D + Q'_A \cdot Q'_D \cdot Q'_E + Q'_B \cdot Q'_C \cdot Q'_E$$

هر گاه:

$$Q'_A = Q'_B = Q'_C = Q'_D = Q'_E = Q'$$

$$Q'_s = 2Q'^2 + 2Q'^3$$

علی‌رغم کاهش قابل توجهی در حجم محاسبات، بی‌دقتی محاسبات بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. و همواره با این روش خطای نسبی برای Q'_s مثبت و مقدار آن به مراتب بزرگتر از قدر مطلق خطای نسبی برای R_s می‌شود. از این رو در این طریق ارزیابی تقریبی، حد بالایی از احتمال شکست سیستم^۱ به دست می‌آید (Singh & Billinton, 1973).

در صورتی که ترم‌های رسته دوم هم منظور شوند حد پایینی احتمال شکست سیستم^۲ حاصل می‌شود و خطای نسبی همواره منفی خواهد بود.

در طریق دوم ارزیابی تقریبی، از مجموعه‌ی انقطاعی که تعداد عضوهای آن بیش از حد معینی است چشم‌پوشی می‌شود. تعداد عضوهای هر مجموعه، رسته‌ی آن را مشخص می‌کند. بنابراین فرض می‌شود که احتمال وقوع مجموعی انقطاع رسته بالا^۳ کوچک و قابل اقصا است و این فرضی است که صحت آن بستگی به میزان قابلیت اطمینان اعضا در مجموعه انقطاع خواهد داشت. وقتی همه اجزا از قابلیت اطمینان زیاد و یکسانی برخوردار باشد فرض فوق صحیح است ولی هر گاه عضوهای

¹ Bound of Unreliability Upper

² Lower Bound

³ High order cut set

مجموعه‌ی رسته‌ی پایین، قابلیت اطمینان زیاد ولی عضوهای مجموعه رسته بالا، قابلیت اطمینان کم داشته باشد موجب عدم صحت این فرض می‌شود. از این رو در استفاده از طریق دوم باید احتیاط کافی مبذول شود.

۲-۲-۲-۳- شناسایی مجموعه‌های انقطاع^۱

شناسایی مجموعه‌های انقطاع با بازبینی عینی میسر است. البته اجرای این روش برای سیستم‌های ساده و کوچک با دشواری زیادی همراه نیست ولی برای سیستم‌های پیچیده‌تر و بزرگ کار دشواری است (Allan & Billinton, 1976).

طبق تعریف زمانی مسیر میان ورودی و خروجی مسیر انقطاع محسوب می‌شود که در آن هر انشعابی با انشعابات دیگر بیش از یک بار تلاقی نداشته باشد. یکی از روش‌های شناسایی مجموعه‌های انقطاع بر اساس گام‌های زیر است (Rasmuson et al, 1978).

۱. همه مسیرهای غیر تکراری مشخص شود.^۲
۲. ماتریس وقوع برای شناسایی عضوهای هر مسیر تشکیل شود.^۳
۳. هر گاه همه‌ی اجزای ستونی از ماتریس وقوع غیر صفر باشد نمایانگر اجزای مجموعه انقطاع رسته اول خواهد بود.
۴. ستون‌های ماتریس وقوع دو به دو ملحق شود. در صورتی که همه‌ی اجزای ستون‌های ملحق شونده غیر صفر باشد، نمایانگر عضوهای مجموعه انقطاع رسته دوم خواهد بود. مجموعه انقطاع رسته دومی که در بردارنده مجموعه‌های رسته اول هستند حذف می‌شوند به نحوی که مجموعه انقطاع‌های رسته دوم غیر تکراری حاصل شود.

¹ Deducing the Minimal Cut Sets

² Minimal Paths

³ Incidence Matrix

۵. مرحله چهارم برای هر ستون ماتریس تکرار شود به نحوی که موجب حذف مجموعه‌ی انقطاع

رسته سوم در بردارنده مجموعه‌های رسته‌ی اول و دوم گردد.

این روش همچنان ادامه یابد تا بالاترین رسته مجموعه‌ی انقطاع به دست آید.

۲-۲-۳- شیوه مجموعه اتصال

شیوه مجموعه اتصال اساساً مکمل شیوه مجموعه انقطاع است ولی به لحاظ این که وضعیت‌های

شکست سیستم را مشخص نمی‌نماید، کمتر مورد استفاده واقع می‌شود.

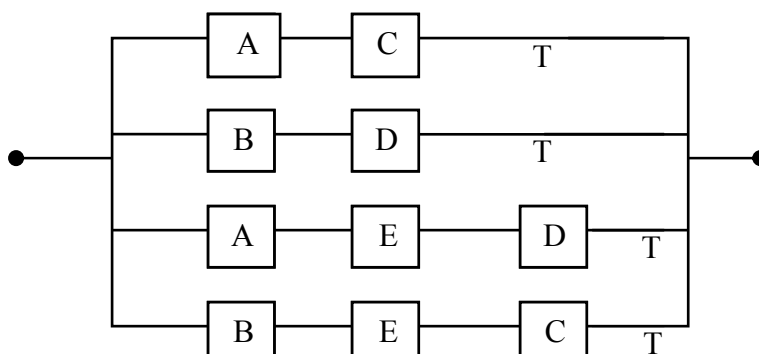
یک مجموعه اتصال عبارت است از مسیری غیر تکراری از سیستم و مجموعه‌ای از عضوهای سری،

که شکست هر یک از اعضا موجب شکست آن مجموعه می‌شود و برای شکست سیستم باید همه

مجموعه‌های اتصال دچار شکست شود. بنابراین در تحلیل هر مجموعه، اصول شبکه سری حاکم است

در حالی که مجموعه‌ها به صورت موازی در حصول عملکرد سیستم نقش دارد. با کاربرد این مفاهیم،

نمودار مجموعه اتصال برای شکل ۳-۲ به صورت شکل ۶-۲ نشان داده شده است.



شکل ۶-۲- مجموعه اتصال شبکه پل (Billinton & Allan, 1992)

مفاهیم شبکه موازی به صورت مستقیم برای بررسی مجموعه‌های اتصال کاربرپذیر نیست زیرا که یک عضو در بیش از یک مجموعه اتصال قرار دارد. ولی به هر حال مفهوم اجتماع^۱ را می‌توان برای تعیین قابلیت اطمینان، به صورت زیر به کار برد (Billinton & Allan, 1992).

$$R_S = P(T_1 \cup T_2 \cup T_3 \cup T_4) \quad (2-13)$$

که در آن T_i نمایانگر i امین مجموعه اتصال و احتمال برقراری آن $P(T_i)$ است. همانند قبل معادله بالا را می‌توان به صورت زیر بست داد.

$$\begin{aligned} R_S &= P(T_1 \cup T_2 \cup T_3 \cup T_4) \\ &= P(T_1) + P(T_2) + P(T_3) + P(T_4) - P(T_1 \cap T_2) - P(T_1 \cap T_3) - P(T_1 \cap T_4) - P(T_2 \cap T_3) - \\ &\quad P(T_2 \cap T_4) - P(T_3 \cap T_4) + P(T_1 \cap T_2 \cap T_3) + P(T_1 \cap T_2 \cap T_4) + P(T_1 \cap T_3 \cap T_4) + \\ &\quad P(T_2 \cap T_3 \cap T_4) - P(T_1 \cap T_2 \cap T_3 \cap T_4) \end{aligned}$$

که در آن:

$$P(T_1) = R_A \times R_C$$

$$P(T_2) = R_B \times R_D$$

$$P(T_3) = R_A \times R_E \times R_D$$

$$P(T_4) = R_B \times R_E \times R_C$$

$$P(T_1 \cap T_2) = P(T_1) \cdot P(T_2) = R_A \times R_B \times R_C \times R_D$$

$$P(T_1 \cap T_3) = P(T_1) \cdot P(T_3) = R_A \times R_C \times R_D \times R_E$$

$$P(T_1 \cap T_4) = P(T_1) \cdot P(T_4) = R_A \times R_B \times R_C \times R_E$$

$$P(T_2 \cap T_3) = P(T_2) \cdot P(T_3) = R_A \times R_B \times R_D \times R_E$$

$$P(T_2 \cap T_4) = P(T_2) \cdot P(T_4) = R_B \times R_C \times R_D \times R_E$$

$$P(T_3 \cap T_4) = P(T_3) \cdot P(T_4) = R_A \times R_B \times R_C \times R_D \times R_E$$

$$P(T_1 \cap T_2 \cap T_3) = P(T_1 \cap T_2 \cap T_4) = P(T_1 \cap T_3 \cap T_4) = P(T_2 \cap T_3 \cap T_4)$$

$$= P(T_1 \cap T_2 \cap T_3 \cap T_4) = R_A \times R_B \times R_C \times R_D \times R_E$$

معادله‌های شیوه مجموعه‌ی انقطاع و مجموعه‌ی اتصال دارای شکل متناظری است با این تفاوت

که مجموعه انقطاع، احتمال شکست را به دست می‌دهد و مجموعه اتصال، قابلیت اطمینان را.

¹ The Concept of union

هر گاه:

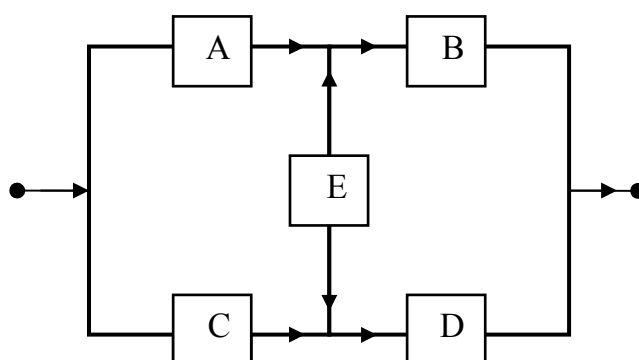
$$T_A = T_B = T_C = T_D = T_E = T$$

$$T_s = 2T^2 + 2T^3 - 5T^4 + 2T^5 \quad (2-13)$$

یکی از معایب عمده‌ی شیوه‌ی مجموعه اتصال عدم محاسبه تقریبی در تعیین میزان قابلیت اطمینان است و این به علت بزرگی قابلیت اطمینان اعضا است. بنابراین حجم محاسباتی در این روش نسبت به شیوه‌ی مجموعه انقطاع با امکان محاسبه تقریبی به مراتب بیشتر است.

۲-۲-۴- شیوه ماتریس اتصال

در این شیوه، ماتریسی بر مبنای شبکه اتصال، مربوط به اجزای یک سیستم تشکیل داده می‌شود. با در نظر گرفتن شبکه پل و شماره‌گذاری گره‌های انشعاب‌ها مطابق شکل ۲-۷ اجزای ماتریس مشخص می‌شود. عدد صفر برای یک جزء ماتریس نمایانگر عدم اتصال میان دو گره و عدد یک برای آن نمایانگر اتصال گره با خودش است. شاخه با یک جهت نمایانگر امکان جریان یک طرفه و شاخه با دو جهت نمایانگر امکان جریان دو طرفه است. اساس این شیوه، تبدیل ماتریس اولیه به ماتریسی است که صرفاً نمایانگر شبکه‌ای با گره‌های ورودی و خروجی باشد (Billinton & Allan, 1992).



شکل ۲-۷- شبکه پل با شماره‌گذاری گره‌ها

$$\begin{array}{c}
 \text{گره} \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \\
 \begin{array}{c}
 1 \\
 2 \\
 3 \\
 4
 \end{array}
 \left(\begin{array}{cccc}
 1 & A & B & 0 \\
 0 & 1 & E & C \\
 0 & E & 1 & D \\
 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

۲-۲-۲-۴-۱- روش حذف گره‌ها

در این روش همه‌ی گره‌هایی که ورودی و خروجی نیست در طی مراحل تبدیل ماتریس حذف می‌شود تا سرانجام ماتریسی 2×2 مشتمل بر گره‌های ورودی و خروجی حاصل گردد. برای حذف یک گره با شماره k ماتریس، هر یک از اجزای آن توسط جزء جدیدی بر مبنای رابطه (۲-۱۴) جایگزین می‌شود (Billinton & Allan, 1992).

$$N'_{ij} = N_{ij} + (N_{ik} \cdot N_{kj}) \quad (2-14)$$

که در آن N'_{ij} جایگزین شونده جزء قبلی N_{ij} در ماتریس است.

برای شبکه پل ابتدا به حذف گره ۲ پرداخته شده است و بنابر رابطه فوق برای اجزاء جدید روابط زیر برقرار می‌باشد.

$$\begin{array}{ll}
 N_{11} = 1 + A \cdot 0 = 1 & : (N_{11} + N_{12} \cdot N_{21}) \\
 N_{13} = B + A \cdot E = B + AE & : (N_{13} + N_{12} \cdot N_{23}) \\
 N_{14} = 0 + A \cdot C = AC & : (N_{14} + N_{12} \cdot N_{24}) \\
 N_{21} = 0 + E \cdot 0 = 0 & \\
 N_{23} = 1 + E \cdot E = 1 & \\
 N_{24} = D + E \cdot C = D + EC & \\
 N_{41} = 0 + 0 \cdot 0 = 0 & \\
 N_{43} = 0 + 0 \cdot E = 0 & \\
 N_{44} = 1 + 0 \cdot C = 1 &
 \end{array}$$

با منظور کردن اجزای جدید، ماتریس اولیه به صورت ماتریس زیر تبدیل خواهد شد.

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & B+AE & AC \\ 0 & 1 & D+EC \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

در این مرحله گره ۳ حذف می‌گردد:

$$N_{11} = 1 + (A + BE) \cdot 0 = 1$$

$$N_{14} = AC + (B + AE) \cdot (D + EC) = AC + BD + BEC + AED$$

$$N_{41} = 0 + 0 \cdot 0 = 0$$

$$N_{44} = 1 + 0 \cdot 1 = 1$$

ماتریس نهایی به صورت زیر است:

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & AC + BD + BEC + AED \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

نتیجه نهایی در قالب جزء N_{14} به دست آمده نمایان‌گر همهٔ مسیرهایی است که ورودی سیستم را به خروجی آن می‌رساند. این مسیرها همان کوتاه‌ترین مسیرهای غیر تکراری است که در شیوه‌ی مجموعه‌های اتصال^۱ مورد نظر می‌باشد و قابلیت اطمینان با شیوه مجموعه اتصال را به دست می‌دهد (Billinton & Allan, 1992).

۲-۲-۲-۲-۲ روش ضرب کردن ماتریس‌ها^۲

در این شیوه ماتریس اولیه مکرراً در خودش ضرب می‌شود تا این‌که نتیجه ضرب بدون تغییر باقی بماند این روش برای شبکه پل به صورت زیر است.

¹ Tie Set

² Matrix Multiplication

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{گره} & 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & A & B & 0 \\ 0 & 1 & E & C \\ 0 & E & 1 & D \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$M^r = \begin{matrix} & \begin{matrix} 4 & 3 & 2 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & A+EB & B+AE & AC+BE \\ 0 & 1 & E & C+DE \\ 0 & E & 1 & EC+D \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$M^r = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & A+EB & B+AE & AC+BE+BEC+AED \\ 0 & 1 & E & C+DE \\ 0 & E & 1 & EC+D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

با افزایش توان M تغییری در ماتریس حاصل نمی‌شود و بنابراین نتیجه نهائی حاصل می‌شود. تبدیل گره ۱ به ۴ همان نتیجه‌ای که با روش حذف گره‌ها حاصل شده بود در این روش نیز دست آمده است. مزیت روش ضرب کردن ماتریس نسبت به روش حذف گره‌ها، در نمایان ساختن مجموعه‌های اتصال میان همه گره‌ها است در حالی که در روش حذف گره‌ها صرفاً تبدیل میان دو گره ورودی و خروجی به نمایش در می‌آید (Billinton & Allan, 1992).

۲-۲-۵- شیوه درخت رخدادها^۱

درخت رخدادها عبارت است از ارائه ترسیمی کلیه رخدادهای محتمل که در یک سیستم می‌تواند واقع شود. علت این نام گذاری شباهتی است که میان انشعاب حالت‌های محتمل و شاخه‌های منشعب در یک درخت وجود دارد.

از این شیوه، برای تحلیل سیستمی که همه عضوهای آن در حال کار مداوم است و یا بخشی از عضوهای آن آماده کار با توالی منطقی مشخصی است استفاده می‌شود. سیستم‌های با آماده کار با توالی منطقی معمولاً سیستم‌های تأمین ایمنی هستند و عملاً شیوه درخت رخدادها برای این سیستم‌ها استفاده متداول دارد. سایر تکنیک‌های تحلیل بیشتر برای سیستم‌های با عملکرد پیوسته و مداوم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای ارائه روش درخت رخدادها در تحلیل سیستم‌های با عملکرد مداوم، شبکه پل در نظر گرفته شده است. رخداد در این سیستم عبارت است از شکست و عملکرد عضوهای آن و با توجه به اینکه ترتیب عملکرد برای آنها مطرح نیست با هر ترتیب دلخواهی بررسی پذیر می‌باشد. نمودار درخت رخداد مطابق شکل ۲-۸ بر مبنای ترتیب اختیاری عضوهای A ، B ، C ، D ، E ارائه شده است که در آن خط عمودی به سمت بالا به معنای عملکرد صحیح و به سمت پایین به معنای شکست این اعضا است. در این شبکه با حضور ۵ عضو و برای هر یک دو حالت، جمعاً تعداد $2^5 = 32$ مسیر وجود دارد که به ترتیب شماره گذاری شده است. برای خلاصه کردن نتایج، نیاز به تفسیر آنها بر مبنای شناخت از عملکرد فیزیکی سیستم است. با علامت گذاری S به معنای عملکرد صحیح و F به معنای شکست سیستم جمعاً تعداد ۱۶ مسیر منجر به وقوع هر یک از دو حالت شده است. البته باید توجه شود که در برخی سیستم‌های پیچیده‌تر ممکن است علاوه بر حالت‌های عملکرد صحیح و شکست

¹ Event Trees

کامل، حالت‌های عملکرد ناقص و شکست موضعی^۱ نیز وجود داشته باشد (Billinton & Allan, 1992).

پس از حصول تمام نتایج محتمل، محاسبه جمع احتمال حالت‌های معین سیستم به سادگی میسر است و از آنجا که نتایج حاصله، رخداد‌های دو به دو ناسازگار می‌باشد جمع کل احتمال نتایج و یا به عبارت دیگر جمع کل احتمال حالت‌های مختلف سیستم برابر یک می‌شود. برای تعیین قابلیت اطمینان سیستم در این مثال خواهیم داشت:

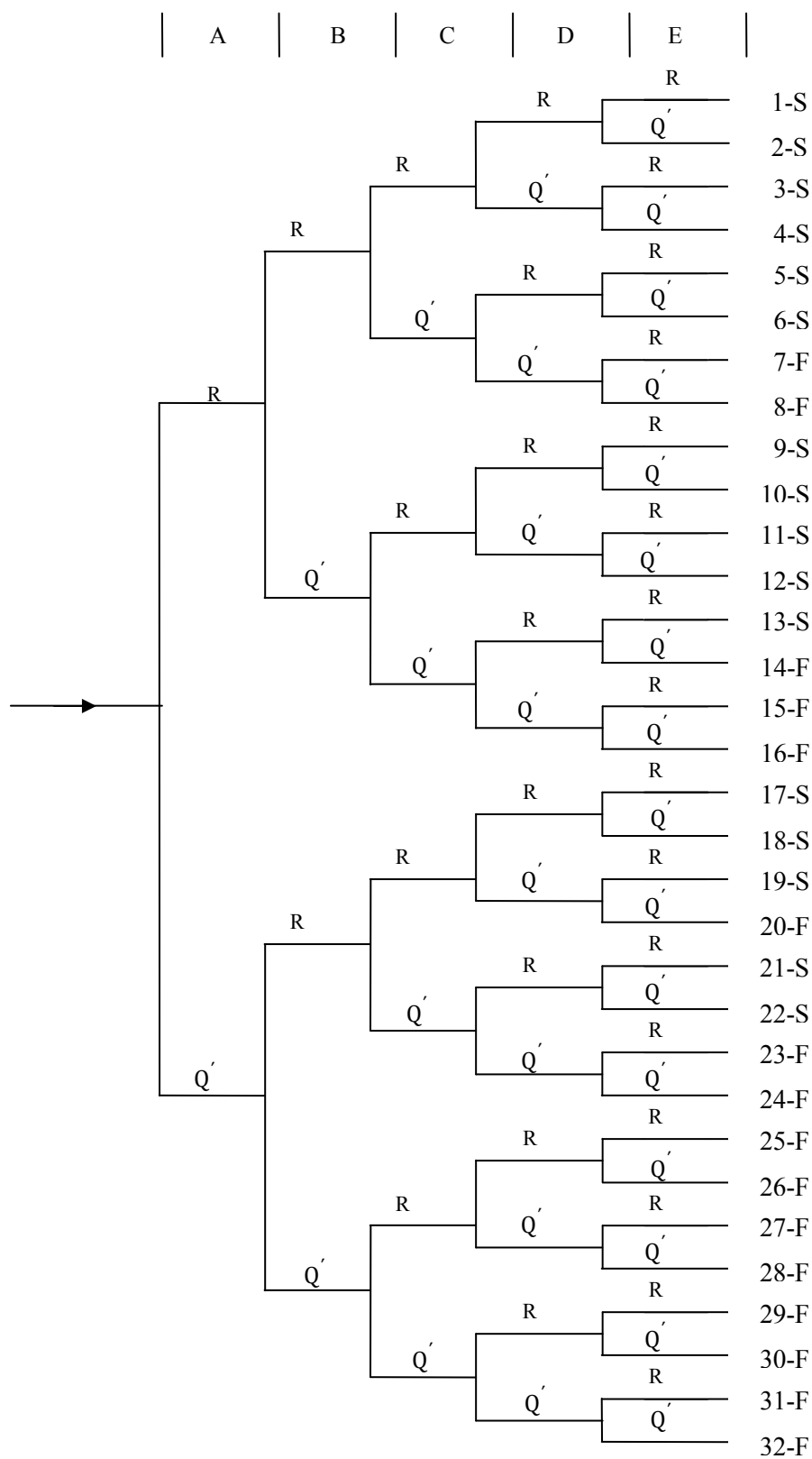
$$R_S = P(P_1) + P(P_2) + P(P_3) + P(P_4) + P(P_5) + P(P_6) + P(P_7) + P(P_8) + P(P_9) + P(P_{10}) + P(P_{11}) + P(P_{12}) + P(P_{13}) + P(P_{14}) + P(P_{15}) + P(P_{16}) + P(P_{17}) + P(P_{18}) + P(P_{19}) + P(P_{20}) + P(P_{21}) + P(P_{22})$$

که در آن: $P(P_i) = i$ احتمال وقوع مسیر

به طور مشابه برای تعیین احتمال وقوع شکست سیستم خواهیم داشت:

$$Q_S = P(P_{23}) + P(P_{24}) + P(P_{25}) + P(P_{26}) + P(P_{27}) + P(P_{28}) + P(P_{29}) + P(P_{30}) + P(P_{31}) + P(P_{32}) + P(P_{33}) + P(P_{34}) + P(P_{35}) + P(P_{36}) + P(P_{37}) + P(P_{38}) + P(P_{39}) + P(P_{40}) + P(P_{41}) + P(P_{42}) + P(P_{43}) + P(P_{44}) + P(P_{45}) + P(P_{46}) + P(P_{47}) + P(P_{48}) + P(P_{49}) + P(P_{50}) + P(P_{51}) + P(P_{52}) + P(P_{53}) + P(P_{54}) + P(P_{55}) + P(P_{56}) + P(P_{57}) + P(P_{58}) + P(P_{59}) + P(P_{60}) + P(P_{61}) + P(P_{62}) + P(P_{63}) + P(P_{64}) + P(P_{65}) + P(P_{66}) + P(P_{67}) + P(P_{68}) + P(P_{69}) + P(P_{70}) + P(P_{71}) + P(P_{72}) + P(P_{73}) + P(P_{74}) + P(P_{75}) + P(P_{76}) + P(P_{77}) + P(P_{78}) + P(P_{79}) + P(P_{80}) + P(P_{81}) + P(P_{82}) + P(P_{83}) + P(P_{84}) + P(P_{85}) + P(P_{86}) + P(P_{87}) + P(P_{88}) + P(P_{89}) + P(P_{90}) + P(P_{91}) + P(P_{92}) + P(P_{93}) + P(P_{94}) + P(P_{95}) + P(P_{96}) + P(P_{97}) + P(P_{98}) + P(P_{99}) + P(P_{100})$$

¹ Partial Success / Failure



شکل ۸-۲- درخت رخدادها برای شبکه پل (Billinton & Allan, 1992).

۲-۲-۲-۶- شيوه درخت معايب

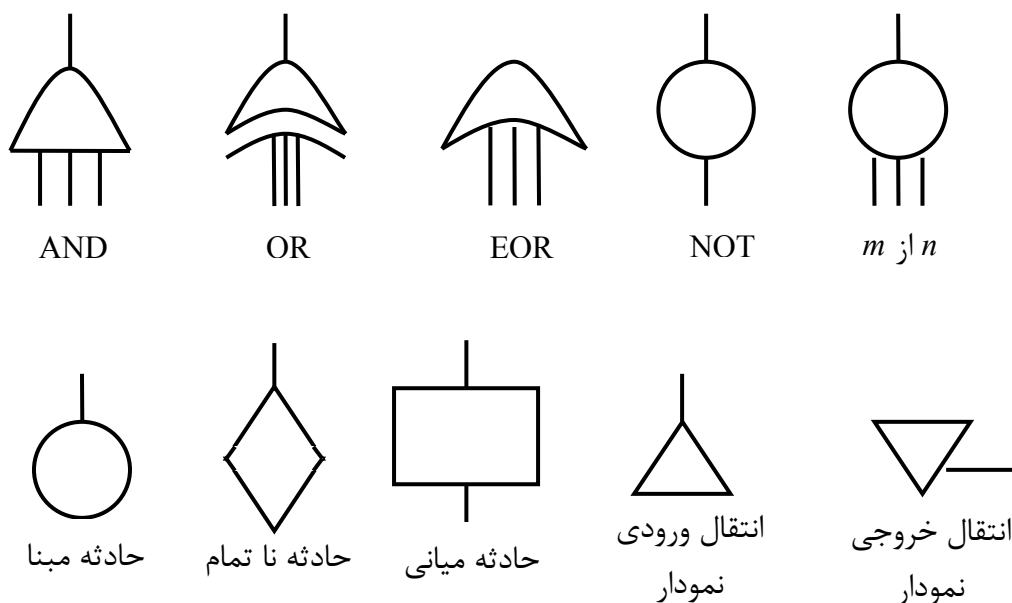
درخت معايب از اولين شيوه‌هاي آريزايي قابليت اطمينان است كه بويژه براي تحليل سيستم با عضوهاي آماده كار و سيستم‌هاي ويژه مأموريت مورد استفاده بوده است. اين شيوه براي بررسي كيفي فرايندهاي شكست سيستم‌هاي پيچيده و همچنين بررسي عواقب شكست آنها استفاده مي‌شود. بررسي‌هاي كمّي نيز با استفاده از اين روش امكان پذير مي‌باشد.

منطق مورد استفاده در شيوه‌ي درخت معايب معكوس منطقي است كه در شيوه درخت رخدادها به كار مي‌رود. در اين شيوه شكست مشخصي از سيستم به عنوان حادثه نهائي^۱ در نظر گرفته مي‌شود. تركيب و توالي ساير شكست‌ها كه منجر به وقوع حادثه نهائي مي‌شود ساختار درخت معايب را بوجود مي‌آورد. براي اين منظور در ابتدا علل اصلي حادثه نهائي شناسايي شده و سپس گام به گام با تجزيه اين علل به جزئيات بيشتر، وابستگي آنها به عملکرد عضوهاي سيستم بررسي مي‌شود. فرايند تقسيم‌بندي به عوامل را مرحله به مرحله تا هر سطحي از تقسيمات مورد نياز ادامه داده مي‌شود. منطق لازم براي ترسيم اين نمودارها مستلزم درك كاملي از عملکرد فيزيكي سيستم مورد بررسي مي‌باشد (Billinton & Allan, 1992).

۲-۲-۲-۱- نمادهای مورد استفاده در نمودار درخت معایب

برای نشان دادن منطق حاکم در نمودار از نمادهای منطقی استفاده می‌شود که در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.

¹ Top Event



شکل ۲-۹- مثال‌هایی از نمادهای درخت معایب (Vesley et al., 1981)

- ✓ نماد AND : معرف وقوع خروجی در صورت وقوع همه ورودی‌ها است.
- ✓ نماد OR : معرف وقوع خروجی در صورت وقوع حداقل یکی از ورودی‌ها است.
- ✓ نماد EOR : معرف وقوع خروجی در صورت وقوع فقط یکی از ورودی‌ها است.
- ✓ نماد $m - out\ of - n$: معرف وقوع خروجی در صورت همزمانی وقوع حداقل m از n ورودی است.
- ✓ حادثه مبنا : معرف پائین‌ترین سطح تقسیمات در نمودار برای بیان علت شکست می‌باشد.
- ✓ حادثه نیمه تمام : معرف حادثه شکستی است که خود ناشی از شکست اعضاء دیگر رخ می‌دهد.
- ✓ حادثه میانی : معرف حادثه شکستی است که در اثر خروجی نمادهای منطقی رخ می‌رهد.
- ✓ انتقال‌ها : انتقال به خارج و انتقال به داخل که برای ارائه مقطع ارتباط یک درخت معایب با درخت‌های معایب منشعب از آن به کار می‌رود.

۲-۲-۶-۲- بررسی کمی احتمال حادثه نهایی

بررسی کمی احتمال حادثه نهایی در درخت معایب به دو طریق انجام می‌گیرد. اول از جبر بولی^۱ و ساختار منطقی درخت معایب برای ترکیب و حادثه‌های مبنا استفاده می‌شود و دوم از قواعد احتمال^۲ و ساختار درخت معایب برای ترکیب و حادثه‌های مبنا استفاده می‌شود. برای هر دو طریق فوق، مثالی بر مبنای شکل ۲-۱۰ در نظر گرفته شده است.

۱. جبر بولے،

این روش با تعریف حادثه نهایی بر حسب حادثه‌های میانی و ارتباط منطقی بین حادثه‌های عامل جایگزین می‌شود. این عمل تا حصول عبارتی برای نمایش حادثه نهایی بر حسب حادثه‌های مبنا و نیمه تمام ادامه می‌یابد به نحوی که همه‌ی حادثه‌های میانی حذف شود.

محاسبات از بالاترین سطح نمودار شروع می‌شود. سپس برای حادثه میانی جایگذاری صورت می‌گیرد بنابراین:

$$T = I + E_{\mathfrak{r}}$$

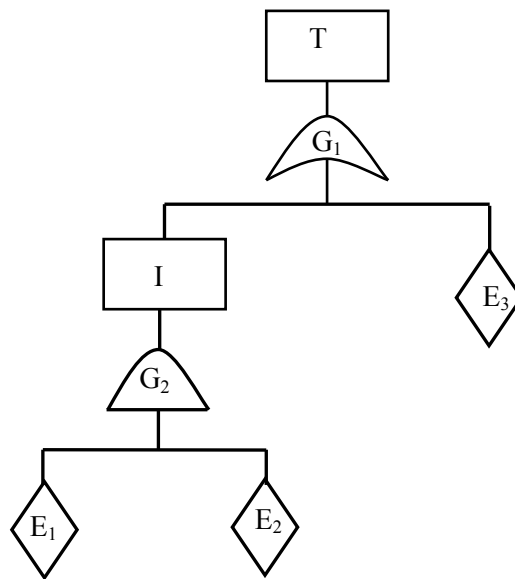
$$I = E_1 E_2$$

$$T = E_{\gamma} + E_{\pi}$$

البته محاسبات فوق به علت مستقل بودن حادثه‌ها و کوچکی مجموعه‌ی آنها مستقیماً و به سادگی انجام گرفت. عملاً با مجموعه بزرگ حادثه‌ها و وابستگی عملکرد عضوها بررسی بسیار دشوار می‌باشد ولی در هر صورت به طور کلی اصول بررسی همه‌ی درخت‌های معایب بر مبنای همین روش ساده استوار است.

¹ Boolean Algebra

² Probability Rules



شکل ۲-۱۰- ترسیمی از یک درخت معایب (Billinton & Allan, 1992)

۲. کاربرد مستقیم مقادیر^۱

بزرگ شدن سیستم‌ها، سبب پیچیده‌تر شدن عبارات جبری می‌شود. روش مناسب‌تر برای این موارد تعیین مقادیر عددی احتمال در هر مرحله از ادغام حادثه‌ها است، تا از شکل‌گیری عبارت جبری مفصل اجتناب شود. بنابراین روش کاربرد مقادیر، روشی از پائین به بالا خواهد بود و با شروع از حادثه‌های مبنا، احتمال حادثه‌های میانی مرحله به مرحله با توجه به نمادهای منطقی به دست آورده می‌شود تا نهایتاً احتمال حادثه نهایی حاصل شود.

$$P(I) = P(E_1)P(E_2)$$

$$P(T) = P(I) + P(E_3) - P(I)P(E_3)$$

از معایب روش کاربرد مستقیم مقادیر تأثیر یک حادثه مبنا در چند حادثه میانی مختلف است، این امر سبب می‌شود احتمال وقوع آن بیش از یک بار در محاسبه احتمال حادثه نهایی منظور شود (Billinton & Allan, 1992).

¹ Direct Numerical Approach

۲-۳- ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم بر مبنای توزیع‌های احتمال

قابلیت اطمینان یک کمیت آماری و مبتنی بر تئوری احتمالات است. بنابراین روش تحلیل آماری، کامل‌ترین و جامع‌ترین روش تحلیل قابلیت اطمینان به شمار می‌آید. یافتن بهترین تابع توزیع چگالی احتمال سازگار با داده‌ها، اولین گام در محاسبات قابلیت اطمینان است. از آنجا که در روش تحلیل آماری معادله تابع زمان به دست خواهد آمد، بنابراین این روش مدل سازی قابلیت اطمینان نام گرفته و سایر روش‌ها که در بخش‌های قبل به آنها اشاره شد به نام تحلیل قابلیت اطمینان شناخته می‌شوند. البته نکته بسیار مهم در مورد مدل سازی قابلیت اطمینان، دقت در نوع داده‌های جمع آوری شده می‌باشد. اگر داده‌ها از نظر آماری مستقل باشند و به طور یکسان توزیع شده باشند برای مدل سازی از آمار کلاسیک و توابع توزیع چگالی معمولی استفاده می‌شود. اما اگر این داده‌ها این شرط را نداشته باشند از روش‌های غیر آماری استفاده می‌شود (Barabady & Kumar, 2008). از آنجایی که در مدل سازی قابلیت اطمینان عموماً روش‌های آماری کلاسیک با داده‌ها سازگارتر هستند، در ادامه تعدادی از توابع توزیع اصلی مورد استفاده در قابلیت اطمینان ارائه می‌شود. از آنجایی که داده‌های مورد استفاده در مسائل آماری می‌توانند به دو صورت گسسته یا پیوسته باشند بنابراین توابع توزیع نیز به دو دسته توابع پیوسته و گسسته تقسیم می‌شوند.

۲-۳-۱- توابع توزیع متغیرهای تصادفی پیوسته

از متغیرهای تصادفی پیوسته برای توضیح پدیده‌های تصادفی که در یک محدوده می‌تواند هر مقداری بگیرند استفاده می‌شود.

در این بخش ۹ تابع چگالی توزیع پیوسته که بیشترین کاربرد را در مهندسی قابلیت اطمینان

دارند ارائه می‌شود (Dhillon, 2008; Gendenka & Ushakov, 1995; Birolini, 2007; Hoyland & Rausand, 2004).

اصطلاحاتی مانند تابع چگالی احتمال^۱ برای توزیع‌های پیوسته و ناپیوسته، تابع توزیع تجمعی^۲ مقدار انتظاری یا میانگین و واریانس و یا انحراف معیار مبین ویژگی‌های توزیع‌ها است که در ارزیابی قابلیت اطمینان نیز به کار می‌رود.

تابع توزیع فراوانی تجمعی با افزایش متغیر اتفاقی از کوچکترین مقدار ممکن تا بزرگترین مقدار ممکن از صفر تا یک افزایش می‌یابد. این تابع برای متغیرهای ناپیوسته به صورت پله‌ای و برای متغیرهای پیوسته به صورت منحنی پیوسته تغییر می‌کند. متغیر اتفاقی در ارزیابی قابلیت اطمینان معمولاً زمان در نظر گرفته می‌شود.

هر گاه در زمان $t = 0$ قطعه یا سیستمی سالم باشد احتمال شکست در زمان $t = 0$ برابر صفر است. با افزایش زمان و میل آنها به سمت بی‌نهایت $t \rightarrow \infty$ احتمال از کار افتادن به سمت عدد ۱ میل خواهد کرد یعنی برای مدت زمان کار طولانی یقیناً آن قطعه و یا سیستم از کار خواهد افتاد. این ویژگی معادل تابع توزیع فراوانی تجمعی است و مقیاسی برای سنجش احتمال از کار افتادن به عنوان تابعی از زمان می‌باشد. در بحث قابلیت اطمینان، تابع توزیع فراوانی تجمعی بنام تابع توزیع فراوانی از کار افتادن شناخته شده و با نماد $Q'(t)$ نشان داده می‌شود.

در بسیاری از موارد عملی، لازم است تا به جای تعیین احتمال از کار افتادن، احتمال بقای آن مورد ارزیابی قرار گیرد. از آنجایی که دو رخداد از کار افتادن و بقا رخدادهای مکمل‌اند هر گاه تابع توزیع فراوانی بقا را با $R(t)$ نمایش دهیم:

$$R(t) = 1 - Q'(t) \quad (2-15)$$

مشتق تابع توزیع فراوانی تجمعی برای یک متغیر پیوسته مانند زمان تابع چگالی احتمال را به دست می‌دهد. بنابراین با مشتق‌گیری تابع توزیع فراوانی از کار افتادن $Q'(t)$ ، تابع چگالی احتمال آن $f(t)$ بر حسب زمان به دست می‌آید:

¹ Probability density function

² Cumulative distribution

$$f(t) = \frac{dQ'(t)}{dt} = \frac{dR(t)}{dt}$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (16-2)$$

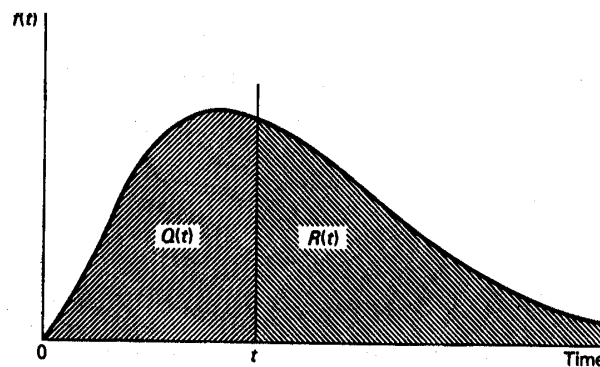
مساحت زیر منحنی تابع چگالی احتمال با زمان بی‌نهایت کلاً برابر یک است بنابراین:

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) dt \quad (17-2)$$

بدیهی است که برای متغیرهای ناپیوسته، معادلات فوق با تغییر انتگرال به مجموعه جملات جبری

همچنان صادق می‌باشد. مقادیر $Q'(t)$ و $R(t)$ با ارائه ترسیمی از تابع فرضی برای چگالی احتمال از

کار افتادن در شکل ۱۱-۲ به صورت مساحت‌های هاشور خورده نمایش داده شده است.



شکل ۱۱-۲- تابع چگالی احتمال فرضی (Birolini, 2007)

۲-۳-۱-۱- توزیع نمایی^۱

متغیر تصادفی t دارای توزیع نمایی است اگر رابطه زیر برقرار باشد:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, f(t) = 0 \text{ for } t < 0; \lambda > 0 \quad (15-2)$$

توزیع نمایی دارای نرخ خرابی ثابت برابر با مقدار λ است. این پارامتر به عنوان یکی از مشخصه‌های

اصلی توزیع نمایی است که سایر توابع توزیع فاقد نرخ خرابی ثابت می‌باشند. توزیع نمایی به طور

گسترده در مهندسی قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

¹ Exponential

۲-۳-۱-۲-توزیع ویبل^۱

توزیع ویبل به عنوان حالت عمومیت یافته توزیع نمایی شناخته می‌شود. متغیر تصادفی t دارای توزیع نمایی است اگر رابطه زیر برقرار باشد:

$$f(t) = \lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1}e^{-(\lambda t)^\beta} \quad t \geq 0, f(t) = 0 \text{ for } t < 0; \lambda, \beta > 0 \quad (۱۶-۲)$$

در این توزیع λ پارامتر مقیاس و β پارامتر شکل توزیع می‌باشند. در حالت $\beta = 1$ توزیع ویبل به توزیع نمایی تبدیل می‌شود. برای $\beta > 1$ ، نرخ خرابی $\lambda(t)$ به طور یکنواخت افزایش می‌یابد. برای $\beta < 1$ ، نرخ خرابی $\lambda(t)$ به طور یکنواخت کاهش می‌یابد.

۲-۳-۱-۳-توزیع گاما^۲

توزیع گاما برای متغیر تصادفی t به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(t) = \lambda \frac{(\lambda t)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, f(t) = 0 \text{ for } t < 0; \lambda, \beta > 0 \quad (۱۷-۲)$$

که در آن $\Gamma(\beta)$ ، تابع کامل گاما^۴ خوانده می‌شود و توسط رابطه ریاضی زیر تعریف می‌شود.

$$\Gamma(\beta) = \int_0^\infty x^{\beta-1} e^{-x} dx \quad t \geq 0, f(t) = 0 \text{ for } t < 0; \lambda, \beta > 0 \quad (۱۸-۲)$$

در توزیع گاما نرخ خرابی با استفاده از رابطه (۱۰-۱) محاسبه می‌شود. در حالت $\beta = 1$ نرخ خرابی ثابت بوده و برای $\beta > 1$ ، نرخ خرابی $\lambda(t)$ به طور یکنواخت کاهش می‌یابد. برای $\beta < 1$ ، نرخ خرابی به طور یکنواخت افزایش می‌یابد با افزایش زمان $\lambda(t)$ به مقدار ثابت λ میل می‌کند.

¹ Weibull

² Monotonically

³ Gamma

⁴ Complete gamma function

۲-۳-۱-۴- توزیع مربع چي

توزیع مربع چي، شکل دیگری از توزیع گاما می باشد که به دلیل اهمیت این توزیع، به طور جداگانه ارائه می شود. در توزیع گاما، اگر $\lambda = 1/2$ و $\beta = v/2$ ($v = 1, 2, \dots$) باشد، این توزیع به توزیع مربع چي با درجه آزادی v تبدیل می شود. کاربرد عمده توزیع مربع چي در محاسبه توزیع پواسون می باشد.

۲-۳-۱-۵- توزیع لاگ نرمال

تابع توزیع لاگ نرمال یکی دیگر از توزیع های مهم و پر کاربرد در علم آمار و قابلیت اطمینان است. این توزیع دارای دو پارامتر عمده بوده و توسط تابع زیر تعریف می شود:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln \lambda t)^2}{2\sigma^2}} \quad t \geq 0, f(t) = 0 \text{ for } t < 0; \lambda, \beta > 0. \quad (19-2)$$

۲-۳-۱-۶- توزیع بتا

تابع توزیع دو پارامتری بتا توسط رابطه ریاضی زیر تعریف و محاسبه می شود.

$$f(t) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} \quad 0 < t < 1, \alpha > 0, \beta > 0. \quad (20-2)$$

توزیع بتا به طور گسترده ای در مهندسی قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین این توزیع نقش مهمی در علم آمار ایفا می کند. متغیرهای تصادفی ورودی این مدل در بازه (۰،۱) قرار داشته بنابراین این توزیع برای مواردی که متغیر تصادفی مبین احتمال باشد یک گزینه مناسب است.

¹ Chi-square

۲-۳-۱-۷- توزیع پارتو

توزیع پارتو اولین بار برای مدل‌سازی درآمد در جوامع ارائه شد. پدیده‌های همچون جمعیت هر شهر، نوسانات موجودی انبار و درآمد شخصی به خوبی با این توزیع قابل مطالعه هستند. تابع توزیع پارتو توسط رابطه ریاضی زیر تعریف می‌شود.

$$f(t) = \frac{\alpha k^\alpha}{t^{\alpha+1}} \quad k \leq t \leq \infty \quad (2-21)$$

با در دست بودن تابع توزیع می‌توان تابع توزیع تجمعی، امید ریاضی، میانگین و سایر مشخصات آماری مربوط به این توزیع را نیز محاسبه نمود.

۲-۳-۱-۸- توزیع نرمال

توزیع احتمال نرمال به نام توزیع احتمال گوسی^۱ نیز نامیده می‌شود و از مهمترین و متداول‌ترین توزیع‌های مورد استفاده در علم آمار و احتمال است و اگر چه در ارزیابی قابلیت اطمینان نیز کاربرد های نسبتاً مهمی دارد ولی در مباحث دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است. تابع چگالی احتمال در توزیع نرمال حول مقدار میانگین کاملاً متقارن است. پراکندگی نتایج نسبت به این مقدار توسط انحراف استاندارد سنجیده می‌شود و بنابراین شکل دقیق و موقعیت تابع چگالی احتمال با این دو شاخص بطور کامل قابل تعیین است. همین دو شاخص در سایر توزیع‌های احتمال نیز تعیین کننده است و باید توجه داشت در جایی که صرفاً این دو شاخص ذکر می‌شود تنها توزیع نرمال مفروض قرار نگیرد.

۲-۳-۱-۹- تابع چگالی توزیع نرمال

تابع چگالی احتمال از نوع نرمال عموماً به صورت زیر است.

¹ Gaussian distribution

$$f(x) = \frac{1}{\beta \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \alpha)^2}{2\beta^2}\right) \quad (22-2)$$

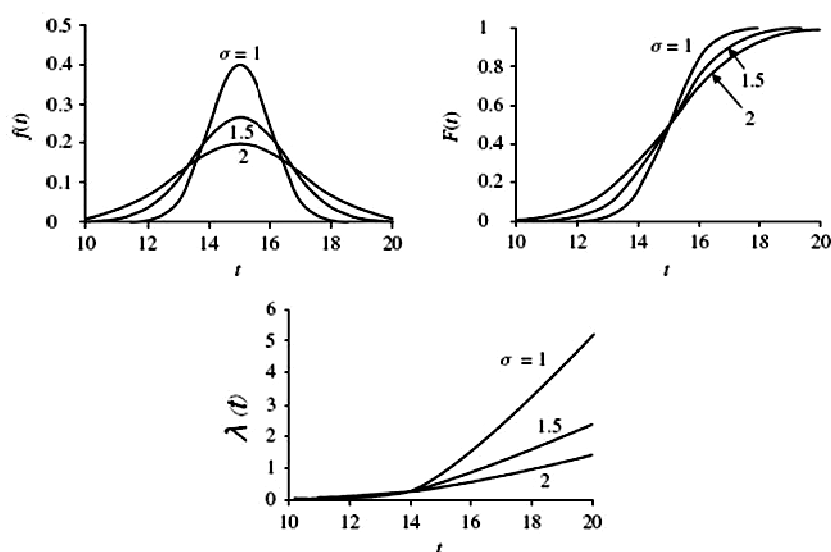
هرگاه مقدار میانگین μ و انحراف استاندارد σ برای عبارت فوق محاسبه شود می‌توان نشان داد که:

$$\mu = \alpha \quad \& \quad \sigma = \beta$$

بنابراین تابع چگالی احتمال برای توزیع نرمال همواره به صورت معادله (23-2) نوشته می‌شود.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (23-2)$$

نمونه‌هایی از شکل تابع چگالی احتمال در شکل ۱۲-۲ الف برای میانگین مشخصی معادل μ و سه مقدار مختلف برای σ ارائه شده است. از ویژگی‌های اصلی تابع توزیع احتمال (تجمعی) که در شکل ۱۲-۲ ب نشان داده شده عبور منحنی از نقطه $(\mu, 0.5)$ است. تغییرات آهنگ وقوع خطر^۱ در شکل ۱۲-۲ ج نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۲- تابع‌های احتمال توزیع نرمال (Dhillon, 2008).

الف. تابع چگالی احتمال ب. تابع توزیع احتمال تجمعی ج. آهنگ وقوع خطر

¹ Hazard rate

از آن جایی که مقدار μ تعیین کننده موقعیت منحنی‌ها در طول محور x است آن را پارامتر تعیین موقعیت^۱ نیز می‌نامند. متشابهاً مقدار σ نیز تعیین کننده میزان پراکندگی^۲ توزیع است و بنابراین آن را پارامتر مقیاس^۳ می‌نامند. از آنجایی که $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$ بنابراین:

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx = 1$$

که صرفاً به مفهوم مساحت زیر منحنی میان دو حد بی‌نهایت است و چون در بر گیرنده‌ی همه‌ی مقادیر میسر برای متغیر اتفاقی x می‌باشد بنابراین برابر یک و به معنای وقوع قطعی است. احتمال وقوع متغیر اتفاقی در فاصله میان هر دو حد اختیاری با تغییر حدود انتگرال، تعیین پذیر است.

۲-۳-۲- توابع توزیع متغیرهای تصادفی گسسته

x یک متغیر تصادفی گسسته است اگر مقادیر ممکن x معین (یا نامعین) و قابل شمارش باشد. در حالت معین فهرست مقادیر x انتها دارد و در حالت نامعین فهرست به صورت نامحدود ادامه می‌یابد. این متغیرها برای تصادف‌هایی استفاده می‌شوند که مقادیر صحیح می‌گیرند. همانند متغیرهای تصادفی پیوسته، متغیرهای تصادفی گسسته نیز با توجه به طبیعت منحصر به فردشان دارای توزیع‌های خاصی می‌باشند. در این بخش تعدادی از توزیع‌های گسسته ارائه شده و مشخصات آماری آن‌ها بررسی می‌شود.

۲-۳-۲-۱- توزیع دو جمله‌ای

برای توضیح و پرداختن به توزیع دو جمله‌ای ابتدا باید توزیع و آزمون برنولی را مورد بررسی قرار دهیم. یک آزمون برنولی به آزمونی اطلاق می‌شود که نتیجه آن بیش از دو حالت باشد. فرض کنیم

¹ Location Parameter

² Spread dispersion

³ Scale Parameter

نتیجه یک آزمون A یا مکمل آن $\bar{A}$ باشد. این خروجی‌ها می‌توانند به صورت متغیر تصادفی زیر نشان داده شوند:

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{if } A \text{ accurse} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (24-2)$$

در این حالت δ متغیر برنولی نامیده می‌شود. لازم به ذکر است که هر آزمون دارای دو نتیجه ممکن (پیروزی یا شکست) بوده و احتمال هر بار آزمون ثابت و بدون تغییر است. تعریف ریاضی این توزیع به صورت زیر است:

$$f(x) = \frac{m!}{x!(m-x)!} p^x q^{m-x}, \quad \text{for } x = 0, 1, 2, 3, \dots, m \quad (25-2)$$

که در آن:

p : احتمال پیروزی در یک آزمون منفرد

q : احتمال عدم پیروزی (شکست) در یک آزمون منفرد

x : تعداد شکست در m آزمون

۲-۳-۲- توزیع پواسون^۱

توزیع پواسون برای شرح بسیاری از پروسه‌های تصادفی کاملاً مناسب است. همچنین از نظر ریاضی و روش محاسبه توزیع ساده‌ای است. تابع این توزیع به صورت زیر است:

$$f(x) = \frac{e^{-\alpha} \alpha^x}{x!} \quad x = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (26-2)$$

از مهمترین ویژگی‌های توزیع پواسون این است که میانگین و واریانس آن برابر α است.

¹ poisson

۲-۳-۲-۳- توزیع هندسی^۱

توزیع هندسی بر پایه توالی آزمون‌های برنولی تعریف می‌شود. در این توزیع متغیر تصادفی x نشان دهنده تعداد آزمون‌ها قبل از اولین رخداد موفقیت آمیز است. تعریف ریاضی این توزیع طبق رابطه (۲۷-۲) است.

$$f(x) = p(p-1)^{x-1} \quad x = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (27-2)$$

پیشامد x زمانی رخ می‌دهد که $x-1$ خرابی یا عدم موفقیت رخ داده باشد. در این توزیع نیز هر موفقیت احتمال p و هر شکست احتمال $1-p$ دارد. مشخصات آماری توزیع هندسی در جدول ۲-۲ به طور کامل ارائه شده است.

۲-۳-۲-۴- توزیع فوق هندسی^۲

توزیع فوق هندسی معمولاً برای مدل‌سازی توزیع نتایج تصادفی حاصل از نمونه‌گیری بدون جایگزینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق تعریف ریاضی این توزیع به صورت زیر است.

$$f(x) = \frac{\binom{k}{x} \binom{N-k}{n-x}}{\binom{N}{n}} \quad x = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (28-2)$$

که در آن:

N : تعداد اعضای موجود در جامعه آماری

n : تعداد نمونه‌هایی که بدون جایگزینی از N برداشته می‌شوند

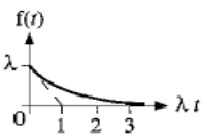
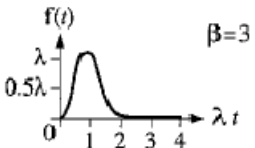
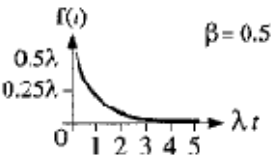
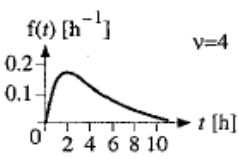
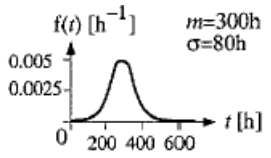
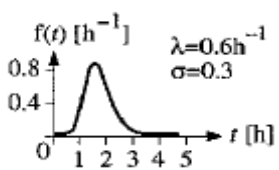
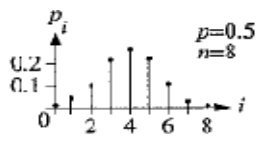
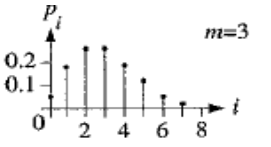
x : تعداد شکست در نمونه‌برداری

k : تعداد شکست‌ها در جامعه آماری

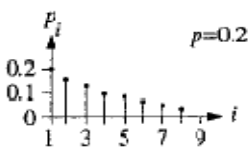
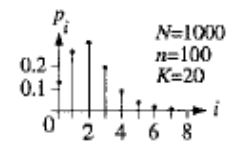
¹ Geometric

² Hypergeometric

جدول ۲-۲- توابع توزیع مورد استفاده در آنالیز قابلیت اطمینان (Birolini, 2007)

نام	تابع توزیع $F(t) = P_r\{\tau \leq t\}$	تابع چگالی $f(t) = dF(t)/dt$	حدود مقادیر
نمایی	$f(t) = 1 - e^{-\lambda t}$		$t \geq 0$ $\lambda > 0$
ویبال	$f(t) = 1 - e^{-(\lambda t)^\beta}$		$t \geq 0$, $f(t) = 0$ for $t < 0$. $\lambda, \beta > 0$
گاما	$f(t) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^{\lambda t} x^{\beta-1} e^{-x} dx$		$t \geq 0$, $f(t) = 0$ for $t < 0$. $\lambda, \beta > 0$
چی اسکور	$f(t) = \frac{\int_0^t x^{\frac{\nu}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} dx}{\frac{\nu}{2} \Gamma(\frac{\nu}{2})}$		$t \geq 0$, $F(\cdot) = 0$ $\nu = 1, 2, \dots$ درجات آزادی
نرمال	$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$		$-\infty < t, m < \infty$
لاگ نرمال	$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln \lambda t)^2}{2\sigma^2}}$		$t \geq 0$, $f(t) = 0$ for $t < 0$. $\lambda, \beta > 0$
دوجمله ای	$f(x) = \frac{m!}{x!(m-x)!} p^x q^{m-x}$		$x = 0, 1, 2, 3, \dots, m$
پواسون	$f(x) = \frac{e^{-\alpha} \alpha^x}{x!}$		$x = 0, 1, 2, 3, \dots$

ادامه جدول ۲-۲ (Birolini, 2007)

$x = 0, 1, 2, 3, \dots$		$f(x) = p(p-1)^{x-1}$	هندسی
$x = 0, 1, 2, 3, \dots, n$		$f(x) = \frac{\binom{k}{x} \binom{N-k}{n-x}}{\binom{N}{n}}$	فوق هندسی

۲-۳-۳- تحلیل اطلاعات

هرگاه با تکرار آزمایش اطلاعات کافی در اختیار قرار گیرد امکان استنتاج و تحلیل کیفی و کمی فراهم می‌شود. در ابتدا باید مدل توزیع فراوانی مناسب برای بیان نتایج را از میان توابع مختلف آماری تشخیص داد. به علت محدودیت منابع (زمان و پول) اجباراً به نمونه‌برداری از جامعه باید اکتفا کرده و از نتایج حاصله برای نمونه در مورد پارامترهای جامعه نتیجه‌گیری کرد. بدین ترتیب سؤالاتی مطرح می‌شود از جمله، با چه کیفیتی نمونه نماینده‌ی جامعه مربوط است؟ کدامیک از توزیع‌های فراوانی تطابق بهتری با نتایج نمونه‌برداری و نهایتاً جامعه دارد؟

مهمترین شاخص‌های آماری عبارت است از میانگین و واریانس نمونه اتفاقی به نحوی که مشاهدات یا نتایج متوالی در تشکیل نمونه کاملاً مستقل از یکدیگر باشد. همان‌گونه که تعریف شد برای میانگین یک نمونه داریم:

$$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{n} \quad (2-29)$$

که در آن x_i مشاهده i ام و n تعداد کل مشاهدات است.

میانگین نمونه $\bar{x}$ تخمینی از میانگین جامعه μ_x تلقی می‌شود و با توجه به این که در نمونه‌برداری‌های دیگر مقادیر مختلفی دارا است خود به عنوان یک متغیر اتفاقی دارای توزیع فراوانی

خاص خود با میانگینی برابر میانگین جامعه μ_x می‌باشد. واریانس توزیع میانگین نمونه‌ها از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma_x^2}{n} \quad (۳۰-۲)$$

ویژگی مهم در اینجا این است که علی‌رغم مناسبت هر نوع توزیع فراوانی برای جامعه، توزیع فراوانی میانگین نمونه‌ها، یک توزیع نرمال و یا خیلی نزدیک به آن است. این پدیده تحت عنوان تئوری حد مرکزی^۱ شناخته می‌شود و حائز اهمیت زیاد در بسیاری از زمینه‌های تحلیل آماری می‌باشد. به عنوان مثال خطاهای موجود در آزمایشات فیزیکی و یا نتایج قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده در تطابق با این تئوری، تحلیل می‌شوند. واریانس یک نمونه $s_{\bar{x}}^2$ طبق رابطه (۳۱-۲) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} s_{\bar{x}}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \end{aligned} \quad (۳۱-۲)$$

واریانس نمونه، تخمینی برای تعیین واریانس جامعه σ_x^2 می‌باشد ولی بر خلاف میانگین نمونه باید با ضریبی مورد تصحیح قرار گیرد تا تخمین بهتری از جامعه بدست آید. ضریب تصحیح برابر $\frac{n}{n-1}$ است و گاهی با نام تصحیح بسل^۲ به کار می‌رود.

$$\sigma_x^2 = \frac{n}{n-1} s_x^2 \quad (۳۲-۲)$$

چنانچه نمونه بزرگتری اختیار شود ضریب تصحیح به عدد یک نزدیکتر می‌شود و وجود آن با بزرگتر شدن نمونه بی‌اثر خواهد شد. عبارت $(n-1)$ در ضریب تصحیح بنام درجات آزادی شناخته می‌شود.^۳ با این توجیه که مقدار حداقل یکی از n نتیجه حاضر در یک نمونه برای حصول میانگین

^۱ Central Limit Theorem

^۲ Bessel Correction

^۳ Degrees of Freedom

مشخص $\bar{x}$ برای آن بستگی به مقادیر $(n - 1)$ نتیجه دیگر دارد. مفهوم درجات آزادی بویژه در ارتباط با بررسی آزمون چگونگی انطباق^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳-۴- آزمون‌های چگونگی انطباق

برای امکان استنتاج از اطلاعات و نتایج در ابتدا باید اطلاعات گروه‌بندی، و به ترتیب صعودی و یا نزولی تنظیم نمود. گروه‌بندی نتایج بر مبنای دامنه‌ی اختیار شده ثابتی که با توالی آنها همه‌ی گستره تغییرات پوشش داده شود صورت می‌گیرد، به نحوی که هیچ یک از نتایج بر روی مرزهای گروه‌بندی واقع نشود.

انتخاب تعداد و پهنای دامنه تقسیمات باید در تناسب با تعداد و محدوده‌ی نتایج نمونه‌برداری و با قضاوت صحیح صورت گیرد تا امکان تشخیص توزیع فراوانی آنها به نحوه مطلوبی فراهم شود، زیرا با تعداد اندک برای تعداد تقسیمات و پهنای زیاد برای دامنه آنها شکل توزیع فراوانی نمایان نمی‌شود و بر عکس با تعدادی زیاد برای تعداد تقسیمات و پهنای کم برای دامنه‌ی آنها، برخی از دامنه‌ها فاقد نتایج و شکل توزیع فراوانی دچار اعوجاج می‌شود. یکی از فرمول‌های راهنما، مناسب در تشخیص تعداد تقسیمات k توسط قاعده استارج در زیر آمده است.

$$\kappa = 1 + 3.3 \log(n) \quad (2-33)$$

که در آن n تعداد نتایج یا مشاهدات است رابطه $(2-33)$ مقدار تقریبی مناسب را به دست می‌دهد و در حوالی نتیجه محاسبه از این فرمول تعداد تقسیمات و پهنای دامنه‌ی آنها، هیستوگرام فراوانی نتایج ترسیم‌پذیر می‌شود. همچنین در تکمیل جدول، مقادیر فراوانی نسبی به صورت انفرادی و تجمعی تعیین‌پذیر و گراف آنها قابل ترسیم می‌باشد. آزمون چگونگی انطباق توزیع فراوانی برای نتایج و اطلاعات به روش‌های مختلف است.

¹ Ranking

به دو روش متداول یکی روش چي اسکوئر^۱ و دیگری کلموگروف - اسمیرنوف^۲ اشاره شده است (Chatfield, 1983).

اساس در روش‌های چگونگی انطباق، تفاوت میان توزیع فراوانی نتایج تجربی و توزیع فراوانی فرضی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تفاوت در قالب یک شاخص، محاسبه می‌شود و در صورتی که مقدار آن از مقدار مشخصی کوچکتر باشد طبق آنچه در روش‌های آزمون فرضیه در علم آمار و احتمال مطرح است باید نتیجه‌گیری شود که دلایل کافی دال بر تفاوت قابل ملاحظه در دست نیست. هرگاه شاخص تفاوت بزرگ باشد فرضیه همسانی^۳ رد می‌شود. که به مفهوم رد شدن همسانی و عدم تفاوت است یعنی انطباق ضعیفی برای توزیع نتایج و توریع فرضی وجود دارد.

۲-۳-۴-۱- آزمون چي اسکوئر

این روش برای آزمون‌های ناپیوسته مناسب است و در این روش اختلاف مقادیر متناظر از توزیع مشاهدات O و توزیع فرضی E به دست آورده شده و در تعیین شاخص چي اسکوئر χ^2 با رابطه (۳۴-۲) به کار می‌رود.

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E} \quad (34-2)$$

نتیجه عمل جمع برای همه‌ی دامنه‌های تقسیمات نتایج با محدودیت زیر به کار می‌رود.

$$\sum_{i=1}^K O_i = \sum_{i=1}^K E_i = n$$

که در آن K تعداد تقسیمات گستره‌ی تغییرات است.

¹ Chi - Squared χ^2

² Kolomogorov - Smirnov $k-S$

³ The Null Hypothesis

توزیع χ^2 عبارت است از یک توزیع پیوسته که شکل آن بر حسب تعداد درجات آزادی ν تغییر می‌کند. تعداد درجات آزادی از رابطه $\nu = K - 1 - m$ به دست می‌آید، که در آن m تعداد پارامترهای لازم در مشخص نمودن توزیع انتظاری است. به عنوان مثال برای یک توزیع نرمال به عنوان توزیع انتظاری دو پارامتر میانگین و انحراف معیار مشخص می‌شود و بنابراین $\nu = K - 3$ می‌شود.

آزمون فرضیه با مقایسه شاخص تفاوت χ^2 به دست آمده با مقدار بحرانی آن χ^2_c از جدول موجود در کتاب‌های آمار و احتمال بر مبنای احتمال وقوع خطای نوع اول α و درجات آزادی قابل محاسبه است.

هرگاه $\chi^2 > \chi^2_c$ باشد با احتمال $(1 - \alpha)$ توزیع‌های نتایج تجربی و انتظاری در انطباق با هم می‌باشد. احتمال α ، سطح تشخیص^۱ نیز نامیده می‌شود و به مفهوم میزان احتمال پذیرش فرضیه همسانی غلط یا احتمال وقوع خطای نوع اول (خطای پذیرفتن فرضیه غلط) است. مقادیر متداول احتمال خطای نوع اول برای آزمون فرضیه ۱٪ و ۵٪ می‌باشد و انتخاب یکی از این دو بستگی به درجه قطعیت تشخیص مورد نیاز در مسأله دارد. آزمون چي اسکوتر نسبت به بزرگی نمونه حساسیت داشته و برای نمونه‌های با تعداد تقسیماتی کمتر از ۵ به کار نمی‌رود (Chatfield, 1983).

۲-۳-۴-۲- آزمون کلموگروف - اسمیرنوف

این روش اساساً برای آزمون توزیع‌های پیوسته مناسب است که در آن شاخص تفاوت بر مبنای انحراف مطلق^۲ میان فراوانی نسبی تجمعی از توزیع انتظاری در مقایسه با توزیع نتایج تجربی است و با رابطه (۳۵-۲) تعیین می‌شود (Billinton & Allan, 1992).

$$D = \max_{i=1}^k |F_{iE} - F_{iO}| \quad (35-2)$$

^۱ Level of significance

^۲ Absolute Deviation

مقدار محاسبه شده با مقدار بحرانی K-S از جدول برای سطوح تشخیص مختلف مقایسه می‌شود. مقادیر بحرانی K-S در جداول در کتاب‌های آمار و احتمالات قابل محاسبه است.

۲-۴- ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم بر مبنای روش‌های شبیه‌سازی^۱

امروزه با پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها، دستگاه‌ها و ساختارهای مهندسی، مسأله مدیریت و ارزیابی آن‌ها نیز پیچیده‌تر شده و نیازمند ابزارهای بسیار قوی و کارآمدی می‌باشد. پیچیدگی‌های مذکور، حاصل ارتباط داخلی اجزای سیستم‌ها بوده و تغییر در یکی از این بخش‌ها، تغییراتی در کل سیستم ایجاد می‌کند. یکی از ابزار توانمند در زمینه تحلیل سیستم‌ها، شبیه‌سازی است (شانون، ۱۳۷۱). شبیه‌سازی به معنی تولید شبیه یک سیستم به هر روش یا صورت ممکن است که در بعضی جهات ممکن است با سیستم مرجع متفاوت باشد. تفاوت شبیه یک سیستم با سیستم مرجع باید تنها محدود به ابعاد و حدود سیستم بوده و از نظر رفتاری نباید با خود سیستم تفاوتی داشته باشد. بنابراین می‌توان گفت شبیه‌سازی، ساختن شبیه سیستم با تمامی رفتارش است (مه‌آبادی، ۱۳۷۸). مزایای شبیه‌سازی به شرح زیر است:

۱- امکان مطالعه سیستم قبل از ایجاد یا پس از انهدام

۲- ساده‌تر بودن حل مسائلی که راه‌حل‌های تحلیلی بسیار پیچیده دارند.

۳- قابلیت تغییر پارامترهای زمانی سیستم مورد مطالعه

۴- مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی و زمانی

۵- عدم محدودیت و خطرات ناشی از مطالعه مستقیم

۶- مطالعه جزء به جزء سیستم و کنار هم نهادن اجزا

۷- دستیابی به حداکثر کارایی

¹ Simulation

۸- ساختن فضای مجازی بسیار قوی در حالی که امکان شبیه‌سازی فیزیکی یا ساخت آن فضا اصلاً ممکن نباشد.

همچنین از معایب شبیه‌سازی:

۱- طراحی یک مدل شبیه‌سازی مناسب و منطبق با شرایط واقعی سیستم امری وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد.

۲- در صورت عدم دقت به جزئیات و ظرایف مسأله ممکن است نتایج نادرستی به بار آمده و وضعیت یک مسأله به خوبی منعکس نشود.

۳- با توجه به این که خروجی شبیه‌سازی یک عدد است، بنابراین در پاره‌ای از مواقع نمی‌توان به علت انتشار خطا به اعداد خروجی اعتماد کرد.

در بخش‌های گذشته، مدل‌سازی قابلیت اطمینان و روش‌های تحلیل سیستم از نظر قابلیت اطمینان به طور کامل مورد بحث قرار گرفتند. مدل‌سازی قابلیت اطمینان در نهایت منجر به پیش‌بینی قابلیت اطمینان سیستم در هر لحظه می‌شود. با توجه به این که مدل، عموماً بر مبنای یک سری ساختار و شبکه ارائه می‌شود، برخی اوقات در سیستم‌ها با شبکه پیچیده، مدل‌سازی‌ها با دشواری‌های عملی و اجرایی مواجه می‌شوند. گاهی نیز مدل‌های آماری، بسیار پیچیده بوده و ابزارهای آنالیز ریاضی نمی‌توانند جواب مناسبی در مورد قابلیت اطمینان سیستم در اختیار گذارند (Dekking et al., 2005).

۲-۴-۱- شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو برای حل مسائل قطعی (غیر تصادفی) و یا برخی مسائل تصادفی که گذشت زمان در آن نقش ندارد، استفاده می‌شود (مه‌آبادی، ۱۳۷۸). روش مونت کارلو یک تکنیک عمومی است که برای هر نوع توزیع ورودی و خروجی قابل استفاده است. این روش با تولید اعداد تصادفی و یا شبه‌تصادفی، از توزیع چگالی مربوط به هر یک از اجزای سیستم نمونه‌گیری کرده و با

قرار دادن این نمونه‌ها در مدل نهایی سیستم، توزیع خروجی را به دست می‌دهد. این روش در حقیقت با استفاده از مدل احتمالاتی سیستم و شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی، یک راه‌حل اساسی برای مسائل ریاضی و فنی ارائه می‌کند (Wang & Pham, 2006). گام‌های اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو به شرح زیر است (Biolini, 2007).

- ۱- تعریف تابع توزیع احتمال برای هر یک از متغیرهای ورودی با استفاده از داده‌های تجربی
- ۲- تولید یک مقدار تصادفی و نمونه‌گیری از توزیع احتمال هر متغیر ورودی با استفاده از اعداد تصادفی تولید شده
- ۳- استفاده از مقادیر انتخاب شده به عنوان پارامترهای ورودی و محاسبه خروجی
- ۴- تکرار گام‌های دوم و سوم تا جایی که یک هیستوگرام و توزیع احتمال پایدار برای خروجی حاصل شود.
- ۵- محاسبه احتمال وقوع خروجی با مقدار دلخواه با استفاده از هیستوگرام به دست آمده

۲-۴-۲- الگوریتم‌های مونت کارلو برای شبیه‌سازی قابلیت اطمینان

کامات و رایلی^۱ در سال ۱۹۷۵ روشی را برای محاسبه قابلیت اطمینان ارائه دادند که براساس نام ارائه دهندگان آن روش K-R نام گذاری شد. این روش برای شبیه‌سازی قابلیت اطمینان هر نوع سیستم با ساختار آزاد و با زیر سیستم‌های دارای توابع توزیع خرابی مختلف به کار می‌رود. در سال ۱۹۸۳ رایس و مور^۲ برای شبیه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده که خرابی‌های زیر سیستم‌های آن دارای توزیع دو جمله‌ای هستند، روش R-M را ارائه دادند. کاربرد ویژه این روش در سیستم‌هایی است که برخی از زیر سیستم‌ها خرابی صفر دارند.

¹ Kamat & Riley

² Rice & Moore

برای کاهش خطا در تخمین حد بالای قابلیت اطمینان در روش R-M چاوو و هانگ^۱ روشی را ارائه کردند که جایگزین روش R-M شده و حدود قابلیت اطمینان سیستم‌های با توزیع دو جمله‌ای را به طور کاملاً دقیق ارائه می‌نماید. این روش C-H نام گرفت.

لین، دوران و لیوایس^۲ در سال ۱۹۸۸ روش L-D-L را ارائه کردند. این روش نیز برای شبیه‌سازی سیستم‌هایی به کار می‌رود که دارای توزیع خرابی دو جمله‌ای باشند. این روش نسبت به دو روش قبل از خود اطلاعات بیشتری در مورد خرابی زیر سیستم‌ها در اختیار کاربر می‌گذارد.

پس از آن در سال ۱۹۹۳ روش L-D توسط لین و دوناقی^۳ ارائه شد. این روش یک روش ترکیبی بین تکنیک مونت کارلو و روش گرافیکی دیاگرام بلوکی قابلیت اطمینان است. کاربرد اصلی این روش در تعیین قابلیت اطمینان و سایر کمیت‌های مربوطه در سیستم‌های با آرایش پل یا سیستم‌های با بیش از ۱۰ زیر سیستم است. بزرگترین ایراد این روش عدم ارائه بازه‌های سطح اعتماد برای قابلیت اطمینان است. روش‌های ذکر شده دارای محاسنی هستند که در زیر به آنها اشاره خواهد شد (Gendenka & Ushakov, 1995).

۱- از تکنیک‌های مذکور می‌توان برای تحلیل سیستم‌های مختلف که زیر سیستم‌هایشان دارای توزیع خرابی متفاوتی هستند سود برد.

۲- این روش‌ها برای هر نوع شبکه و ساختار قابلیت اطمینان بدون توجه به پیچیدگی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳- از این روش‌ها می‌توان برای تعیین دسترسی سیستم‌ها به سادگی استفاده کرد.

۴- این روش‌ها با استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری به راحتی، با سرعت و دقت بالا قابل پیاده‌سازی و محاسبه هستند.

¹ Chao & Hang

² Lin, Duran & Lewis

³ Lin & Donaghy

۵- با استفاده از این تکنیک‌ها بازه قابلیت اطمینان محاسبه شده با سطح اعتماد مشخص قابل محاسبه و تحلیل است.

۲-۴-۳- روش زنجیره‌های مارکوف

روش مارکوف یکی از توانمندترین و پرکاربردترین روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان است. این روش بر مبنای حالت‌های سیستم استوار بوده و با حل معادلات دیفرانسیلی سیستم، قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه می‌نماید.

فرضیات زیر در روش مارکوف در نظر گرفته می‌شود (Dhillon., 2008; Wang & Pham, 2006).

۱- نرخ خرابی و نرخ تعمیر (نرخ انتقال) ثابت هستند.

۲- تمامی رخدادها مستقل از هم هستند.

۳- احتمال انتقال سیستم از یک حالت به حالت دیگر در بازه زمانی Δt برابر است با $\lambda \Delta t$ ، که λ نرخ انتقال سیستم می‌باشد.

روش مارکوف برای مدل‌سازی رفتار اتفاقی سیستم‌هایی کاربردپذیر است که به طور پیوسته یا ناپیوسته نسبت به زمان و یا در فضای حالت در تغییراند. این تغییرات پیوسته و یا ناپیوسته اتفاقی را اصطلاحاً فرایند اتفاقی^۱ می‌نامند. البته همه‌ی فرآیندهای اتفاقی را نمی‌توان توسط روش مقدماتی مارکوف مدل‌سازی کرد ولی می‌توان از روش‌های دیگری بر مبنای همین روش مقدماتی استفاده کرد. به منظور کاربرد روش مارکوف رفتار سیستم باید نمایانگر فقدان حافظه^۲ باشد، یعنی حالت و وضعیت آینده سیستم مستقل از وضعیت‌های گذشته، بجز آخرین وضعیت آن باشد. بنابراین رفتار اتفاقی آتی یک سیستم صرفاً بستگی به وضعیت حال آن داشته و هیچ‌گونه وابستگی به گذشته و یا چگونگی حصول وضعیت حال ندارد. به عبارت دیگر رفتار سیستم باید در همه

¹ Stochastic process

² Lake of memory

مقاطع زمانی یکسان و احتمال تبدیل وضعیت آن به وضعیت‌های دیگر همواره در همه زمان‌ها ثابت بماند. مفهوم فوق به بیان توزیع احتمال به معنای آهنگ ثابت وقوع خطر است. تابع‌های پواسون و نمایی برای این منظور مورد توجه می‌باشند. هرگاه احتمال تغییرات در فرآیندی تابع زمان باشد، آن فرآیند را غیر مارکوفی^۱ می‌نامند. بطور کلی در مدل‌های مارکوف، زمان و فضا به شکل پیوسته و یا ناپیوسته مفروض می‌باشد. در ارزیابی قابلیت اطمینان معمولاً فضا را به عنوان تابع ناپیوسته ارائه می‌کنند. زیرا موقعیت مکانی به صورت ناپیوسته مشخص کننده محل استقرار یک سیستم و اجزای آن است.

۲-۵- نتیجه‌گیری

کلیه روش‌های تحلیل و محاسبه قابلیت اطمینان که در این پایان‌نامه بررسی شده در جدول ۲-۳ ارائه شده است.

جدول ۲-۳- روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان

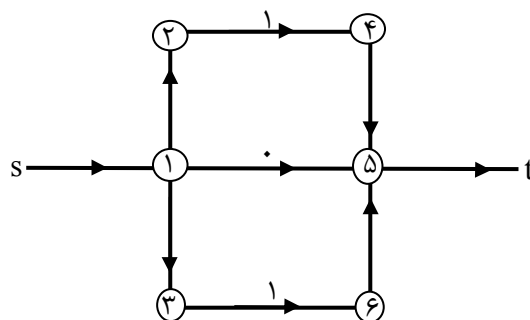
روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان			
روش‌های شبیه‌سازی	روش‌های مبنی بر توزیع‌های احتمال		روش‌های تحلیلی
	توزیع‌های احتمال‌های گسسته	توزیع‌های احتمال‌های پیوسته	
مونت کارلو	دوجمله‌ای	نمایی	احتمال شرطی
		ویبال	مجموع انقطاع
	پواسون	گاما	
		چی اسکور	مجموع اتصال
زنجیره‌های مارکوف	هندسی	نرمال	
		لاگ نرمال	درخت رخداد
	فوق هندسی	بتا	
		پارتو	درخت معایب

¹ Non- Markovian

تفاوت عمده میان کلیه شیوه‌های ارائه شده در جدول بالا در روش استدلال و نحوه ارائه است و نه در مفاهیم بنیادی آنها.

اساس تحلیل در کلیه این روش‌ها از دیدگاه قابلیت اطمینان برای عملکرد صحیح یک سیستم با شبکه سری باید همهٔ عضوهای آن در حال کار باشد و بنابراین از کار افتادن هر یک از اعضا موجب از کار افتادن سیستم می‌شود بنابراین برای شبکه‌های تهویه سری شرایط بالا کاملاً صادق می‌باشد. از دیدگاه قابلیت اطمینان هر گاه فقط یکی از عضوهای سیستمی با شبکه موازی سالم باشد سیستم همچنان دارای عملکرد انتظاری خواهد بود و بنابراین فقط زمانی که کلیه اعضا از کار بیفتند سیستم از کار خواهد افتاد.

برای شبکه‌های تهویه به صورت موازی این شرایط برقرار نیست چرا که تنها اگر یک شاخه از مجموعه شاخه‌های شبکه تهویه از کار بیفتد کل شبکه تهویه ناکارآمد خواهد بود. عدم کاربری این اصل در محاسبه قابلیت اطمینان برای یک مثال در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳- تحلیل اصول قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه موازی

تحلیل قابلیت اطمینان در شبکه‌های موازی بر اساس اصول ارائه شده در روش‌های بالا برای شکل ۲-۱۳ برابر است با:

$$R_p = 1 - (0 \times 1 \times 0) = 1$$

و این در حالی است که بر اساس اصول قابلیت اطمینان مربوط به شبکه‌های تهویه قابلیت اطمینان مربوط به شبکه ۲-۱۳ صفر خواهد بود. کلیه اصول به کار رفته در تحلیل قابلیت اطمینان مربوط به شبکه‌های تهویه در فصل‌های آینده به تفصیل آورده شده است.

فصل سوم

قابلیت اطمینان در شبکه تهویه

۳-۱- مقدمه

گرد و غبار به هر صورت و در هر مکانی می‌تواند عامل زیان‌آوری به حساب آید. حضور این عامل میدان دید را کاهش داده، سبب ناراحتی‌هایی از جمله حساسیت زیاد شده و خسارت‌های عمده به ماشین‌آلات و یا تجهیزات مکانیکی وارد می‌آورد. زغال مخلوط با هوا نیز به عنوان یک نمونه از گرد و غبار معمول در معادن زغال‌سنگ، ترکیب قابل انفجاری را تشکیل می‌دهد و به همین دلیل، سبب حوادث ناگوار زیادی در معادن شده است که در نتیجه آن هزاران نفر جان خود را از دست داده‌اند.

تهویه در معادن عبارت است از ایجاد جریان‌های طبیعی و یا مصنوعی هوا، در راهروها و کارگاه‌های زیرزمینی به منظور تأمین شرایط سالم کار برای کارگران که مجبور به فعالیت یا رفت و آمد در معدن هستند. در تهویه مناسب اساس کار جلوگیری از ایجاد مخلوط قابل انفجار هوا و متان (گریزو)، خارج کردن بخارات سمی، خنک کردن کارگاه‌های گرم و تأمین شرایط سالم کار و بالاخره رقیق کردن و جلوگیری از تراکم فوق‌العاده گرد و غبار در جریان عملیات بهره‌برداری است.

یکی از عوامل خطرات بهداشتی و جانی که کارکنان صنایع زغال‌سنگ با آن مواجه هستند، گاز متان است که معمولاً در معادن زغال‌سنگ وجود دارد، زیرا مخلوط ۵ تا ۱۵ درصد آن با هوا انفجارآمیز است. از این رو، مقدار گاز متان در معادن زغال‌سنگ باید دقیقاً کنترل شود. البته علاوه بر متان،

گازهای دیگری مانند منوکسید کربن ، دی اکسید گوگرد نیز همراه با آن در معادن زغال سنگ وجود دارند که نه از نظر انفجار بلکه از نظر مسموم کنندگی می توانند برای سلامتی کارگران معدن زیان آور باشند.

تنفس گرد زغال به مدت طولانی با غلظت بالا موجب بروز بیماری های ریوی می شود. بیماری های ریوی ناشی از گرد و غبار از جمله قدیمی ترین بیماری های شغلی است. گر چه بعید است افرادی که در دوران پارینه سنگی که ابزارهای سنگی می ساختند دچار ناراحتی های ناشی از تنفس گرد و غبار سیلیس شده باشند اما آثار بیماری های ریوی در اجساد مومیایی شده مصری که از ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ سال قبل از میلاد بجای مانده، مشاهده شده است.

اصطلاح پنوموکوینوز^۱ معدن کاران زغال و آنتراسیلیکوز^۲ برای بیان و تشریح این بیماری به کار می رود. گر چه علل مختلف بروز آن هنوز هم به روشنی مشخص نشده است، ولی ماهیت و مشخصات این بیماری ریوی که ناشی از گرد زغال است به خوبی شناخته شده می باشد. شیوع بیماری پنوموکوینوز در معادن زغال سنگ سخت معمولاً زیادتر از معادنی است که زغال نرم تولید می کنند. کارگران زیادی در معادن در معرض گرد غبار زغال سنگ و سنگ های دیگر قرار دارند، که گرد و غبار ناشی از سنگ در موقع عملیات پیشروی تونل ها و زمانی که نوارهای خاکی داخل لایه های زغال و یا قسمتی از کمر بالا و کمر پایین آن همراه زغال استخراج می شوند متصاعد می گردد. به این ترتیب گرد و غباری که مورد تنفس قرار می گیرد دارای مقداری سیلیس آزاد بود که شرایط را بسیار وخیم تر می کند (زاد یوسفی، ۱۳۵۹).

با توجه به آنچه ذکر شد، مهمترین ضرورت سیستم تهویه در معادن زغال، رقیق کردن گاز متان و زودودن گرد و غبار است. بسیاری از معادن، در سطح کار فعلی تقریباً فاقد گاز هستند و رطوبت نسبی و سرعت هوا در حد معقول است (مدنی و همکاران، ۱۳۷۳).

¹ Pneumoconiosis

² Anthrasilicosis

شبکه تهویه در معادن زیر زمینی نیز می‌تواند با روش‌های مشابه آنچه که برای تعیین قابلیت اطمینان سایر 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 اطمینان شبکه در شرایط عدم قطعیت بررسی شود. به عبارت دیگر شبکه‌ی در معرض آسیب باید به نحوی طراحی، ارتقاء و بازسازی شود که در صورت بروز یک آسیب خاص، عملکرد مناسب یا حداقل قابل پیش‌بینی داشته باشد.

به هر حال ملاحظات اقتصادی و ایمنی در یک معدن زیر زمینی 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. برای طراحی یا ارزیابی یک شبکه تهویه در راستای دستیابی به اهداف مورد انتظار 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 چگونگی عملکرد شبکه تهویه وجود ندارد. به نظر می‌رسد محاسبه قابلیت اطمینان اجزای شبکه و در نهایت محاسبه قابلیت اطمینان شبکه، بهترین روش برای دستیابی به این هدف باشد.

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

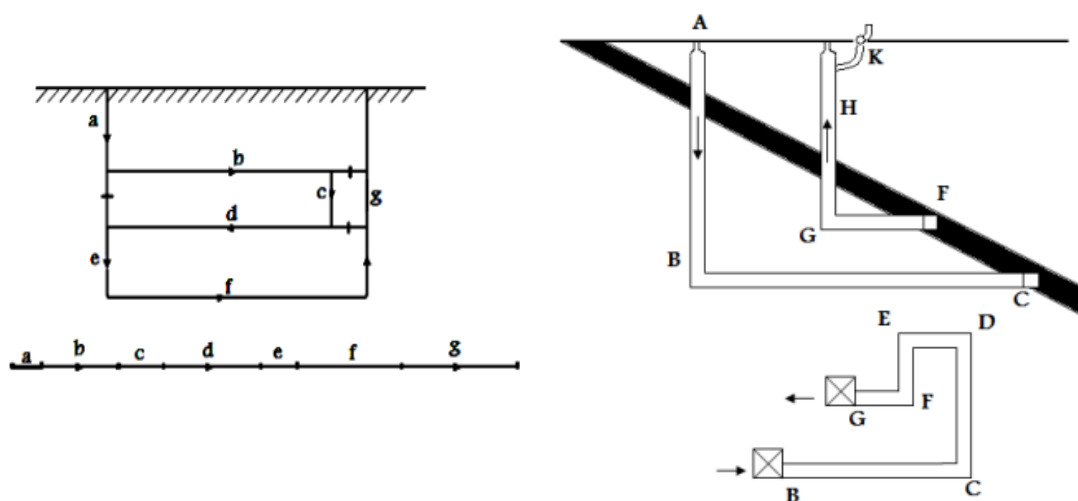
متناسب با افزایش مقاومت آن شاخه و کاهش شدت جریان نسبت به شدت جریان طراحی شده در هر شاخه تعریف شده است.

۳-۲- شبکه‌های تهویه

شبکه‌های تهویه شامل چندین کار معدنی هستند که بسته به حالت قرارگیری آنها نسبت به هم شبکه سری، موازی، قطری و مرکب را به وجود می‌آورند.

۳-۲-۱- شبکه سری

شبکه تهویه، که هوا پی در پی و بدون انشعاب از داخل آنها عبور کند، شبکه با اتصال سری نامیده می‌شود. شبکه تهویه مربوط به استخراج یک لایه منفرد جزء این دسته منظور می‌گردد. در شکل ۳-۱- شبکه استخراج یک لایه و اتصال چند طبقه از معدن به حالت سری نشان داده شده است.



ب- اتصال چند طبقه از معدن به حالت سری

الف- شبکه استخراج یک لایه

شکل ۳-۱- شبکه تهویه با اتصال سری (Skochinsky & Komarov, 1964)

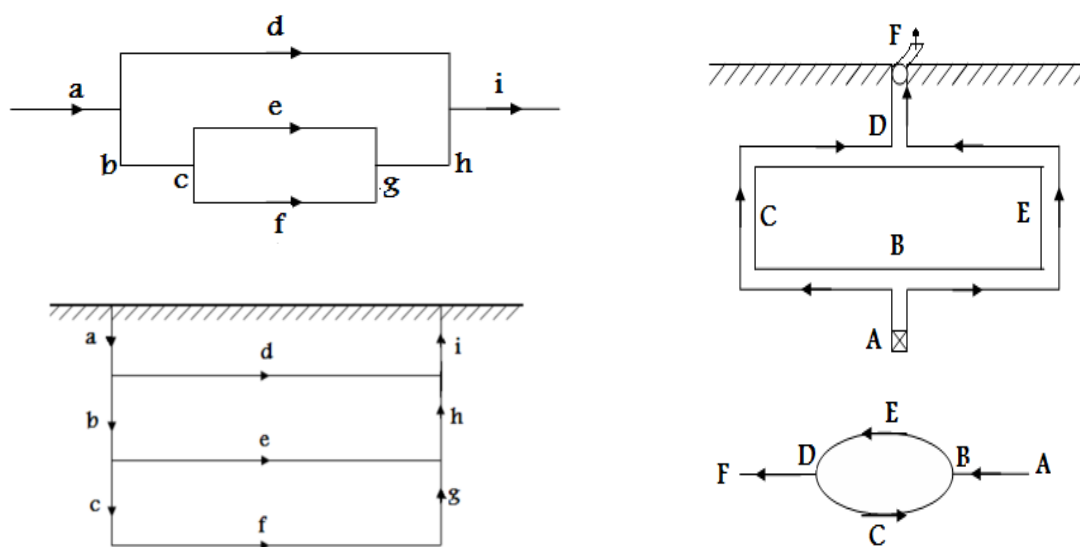
از دیدگاه قابلیت اطمینان برای عملکرد صحیح یک سیستم با شبکه سری باید همهٔ عضوهای آن در حال کار باشد و بنابراین از کار افتادن هر یک از اعضا موجب از کار افتادن سیستم می‌شود.

بنابراین برای هر شبکه تهویه سری که شامل n عضو است قابلیت اطمینان از روابط (۲-۱) و (۲-۲) ارائه شده در فصل دوم قابل محاسبه است.

۲-۲-۳- شبکه موازی

در مواردی که دو یا چند کار معدنی، از یک نقطه منشعب شوند و در نقطه‌ای دیگر مجدداً به هم پیوندند و غیر از دو نقطه مزبور هیچ‌گونه ارتباط دیگری بین آنها نباشد، شبکه حاصل شبکه موازی نامیده می‌شود.

ساده‌ترین شبکه موازی احداث کارگاه استخراج در طرفین یک لایه و یا رگه است. که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



الف- تصویر افقی

ب- تصویر قائم و نمودار معادل تصویر قائم

شکل ۲-۳- شبکه تهویه با اتصال موازی (Skochinsky & Komarov, 1964)

از دیدگاه قابلیت اطمینان هر گاه فقط یکی از عضوهای سیستمی با شبکه موازی سالم باشد سیستم همچنان دارای عملکرد انتظاری خواهد بود و بنابراین فقط زمانی که کلیه عضوها از کار بیفتند سیستم از کار خواهد افتاد.

قابلیت اطمینان شبکه‌های موازی بر اساس روابط (۲-۵) و (۲-۶) ارزیابی می‌شود و برای شبکه با n عضو بر اساس رابطه (۲-۷) قابلیت اطمینان شبکه برابر خواهد بود با:

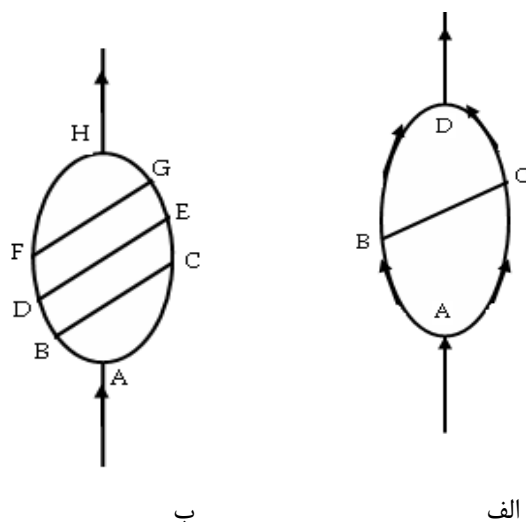
$$Q_P = \prod_{i=1}^n Q_i$$

$$R_P = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i$$

در شبکه‌های تهویه نمی‌توان از روابط بالا برای تحلیل قابلیت اطمینان شبکه استفاده کرد. همان‌گونه که ذکر شد هر یک از اجزای شبکه تهویه در تعیین قابلیت اطمینان شبکه نقش اساسی دارند از این‌رو قواعد استفاده شده در شبکه‌های موازی در این گونه شبکه‌ها کاربرد ندارد. به منظور رفع این نقص قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه با استفاده از الگوریتم دیکسترا تحلیل شده است که به تفصیل آورده خواهد شد.

۳-۲-۳- شبکه قطری^۱

هر گاه شاخه‌های یک شبکه تهویه، علاوه بر نقاط ابتدا و انتها، در چند نقطه دیگر نیز توسط کارهای معدنی به یکدیگر متصل باشند، شبکه حاصل را شبکه قطری می‌نامند.



شکل ۳-۳- شبکه قطری (Skochinsky & Komarov, 1964)

¹ Diagonal Connection

هر یک از کارهای معدنی که انشعابات اصلی را به هم وصل می‌کنند، قطر شبکه نامیده می‌شود. اگر شبکه تنها دارای یک قطر باشد، (شکل ۳-۳-الف)، شبکه قطری از درجه اول و در حالتی که دارای دو یا چند قطر باشد، از درجات دوم و بالاتر خوانده می‌شود (شکل ۳-۳-ب). ویژگی شبکه‌های قطری آن است که معمولاً در آنها یک یا چند کار معدنی وجود دارد که در داخل آن، هوا ممکن است در دو جهت مخالف هم عبور کند و یا اینکه جریان هوا در داخل آن متوقف باشد. به عنوان مثال، در شبکه قطری درجه اول شکل ۳-۳-الف، جهت جریان هوا در مسیرهای ABD و ACD همواره از نقطه A به نقطه‌های B و C و از این نقاط به نقطه D است و حالت غیر آن امکان‌پذیر نیست. اما در قطر BC، جهت جریان هوا ممکن است از B به C و یا بر عکس یعنی از C به B باشد. همچنین اگر مقاومت قطعه BD در مقایسه با مجموع مقاومت‌های BC و CD قابل توجه باشد ممکن است قسمتی از هوایی که از نقطه A به B می‌رسد از طریق مسیر آسانتر BCD به نقطه D برسد و در حالت عکس، اگر مقاومت قطعه BD در مقایسه با سایر قسمت‌ها اندک باشد قسمتی از هوایی که از نقطه‌ی A به نقطه C می‌رسد از طریق مسیر CBD به نقطه D خواهد رسید. بدیهی است وجود چنین قسمت‌هایی در شبکه، که در آنها عبور هوا در هر دو جهت امکان‌پذیر است احتیاج به مراقبت شدید دارد زیرا در بسیاری موارد ممکن است باز شدن یا بسته شدن درهای تهویه در یکی از نقاط شبکه مقاومت نسبی شاخه‌ها را تغییر دهد و هوا را در جهت عکس مورد نظر در این قبیل قسمت‌ها به جریان اندازد.

شبکه‌های قطری بر خلاف سیستم‌های سری و موازی ساختار ساده‌ای نداشته بلکه دارای منطق عملکرد پیچیده‌ای هستند. ساختار شبکه قطری تشابه بسیار زیادی با سیستم با شبکه پل دارد، این شبکه کاربرد بسیار گسترده‌ای در سیستم‌های مهندسی دارد.

۳-۲-۴- شبکه مرکب

شبکه تهویه در معادن بزرگ ساختار پیچیده‌ای دارند. این شبکه‌ها از ترکیب شبکه‌های سری، موازی و قطری تشکیل شده‌اند. برای تحلیل این نوع سیستم‌ها همانگونه که در بخش ۲-۱-۱-۵ بیان شد روش‌های متعددی وجود دارد. با این توضیح که قوانین مربوط به شبکه‌های سری برای شبکه‌های تهویه نیز صادق است اما از آنجایی که شبکه‌های قطری و مرکب شامل شاخه‌های موازی نیز هستند از قوانین مربوط به محاسبه قابلیت اطمینان که تا به حال گفته شده نمی‌توان استفاده کرد.

۳-۴- مدل‌سازی شبکه‌های تهویه

در حالت کلی شبکه تهویه معدن از تعدادی کار معدنی که در نقاط مختلف با یکدیگر ارتباط دارند تشکیل شده است. تونل‌ها و کارهای معدنی در یک شبکه تهویه، شاخه‌هایی هستند که در نقاط گره به یکدیگر متصل شده‌اند. برای مدل‌سازی حرکت قطار و محاسبه قابلیت اطمینان شبکه تهویه، نخست مدل گرافی معدن تهیه و پس از محاسبه شبکه، مدل‌سازی مربوط به آن صورت می‌گیرد. شبکه معدن شامل تونل‌های دنباله‌رو (تونل باربری و تهویه)، دویل‌های تهویه، کارگاه‌های استخراج و پهنه‌های تخریب شده است. به منظور دستیابی به طرح گرافیکی شبکه، ساده‌سازی‌هایی به شرح زیر صورت می‌گیرد.

۱. پهنه‌های استخراج شده و تخریب شده نیازی به هوارسانی نداشته بنابراین از شبکه گرافی معدن حذف می‌شوند.

۲. محل برخورد هر یک از کارهای معدنی به یک‌دیگر برای مثال محل برخورد تونل‌های دنباله‌رو به دویل‌های تهویه یک گره محسوب می‌گردند.

۳-۵- شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه تهویه

شاخص کلاسیک قابلیت اطمینان، احتمال وقوع از کار افتادگی را تعریف می‌کند. همان‌گونه که در بخش ۱-۴-۱ بیان شد شاخص‌های قابلیت اطمینان شامل پارامترهای زیر می‌باشد.

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

این شاخص‌ها هر یک با استفاده از تئوری مربوط به بحث قابلیت اطمینان قابل ارزیابی هستند و انتخاب آن‌ها بستگی به نوع مسأله دارد.

در مورد هر شاخه شاخص قابلیت اطمینان 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 اطمینان شاخه مزبور محاسبه می‌شود. نهایتاً این سیستم بزرگتر شده و قابلیت اطمینان هر شاخه به کل شبکه تعمیم داده می‌شود.

در طراحی سیستم‌های تهویه معادن زغال‌سنگ، شدت جریان هر شاخه با توجه به کاربری هر شاخه تعیین می‌شود. عمدتاً 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، گرد و غبار تولید شده و 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 نهایتاً شدت جریان مربوط به کل شبکه اندازه‌گیری می‌شود. با این تفصیل در مورد هر شاخه شاخص قابلیت اطمینان 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 اطمینان شاخه مزبور محاسبه می‌شود. نهایتاً این سیستم بزرگتر شده و قابلیت اطمینان هر شاخه به کل شبکه تعمیم داده می‌شود. با استفاده از این تعریف می‌توان برای شدت جریان خروجی از هر سیستم رده بندی مناسبی با توجه به کاربرد شاخه مورد بررسی، ارائه داد. از طریق این تعریف حد مجاز تغییرات و قابلیت اطمینان این سیستم در نتیجه تغییرات شدت جریان قابل محاسبه است.

۳-۶- معیار عملکرد رضایت‌بخش در هر شاخه از شبکه تهویه

تعیین معیار عملکرد رضایت‌بخش، به قضاوت‌های مهندسی و انتظارات بهره‌برداران از یک سیستم بستگی دارد. از کار افتادگی در یک سیستم ممکن است به شکل‌های مختلف به شرح زیر اتفاق افتد (Dhillon, 2008):

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 اطمینان باید معیار عملکرد رضایت‌بخش مناسب معرفی شود و رده بندی‌هایی بر اساس آن معیار به منظور محاسبه قابلیت اطمینان ارائه شود. برای معرفی معیار عملکرد رضایت‌بخش در هر شاخه با توجه به کاربری شاخه‌های مختلف، شاخه‌های تشکیل دهنده شبکه تهویه 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 برخوردار نبوده و معیاری که می‌توان بر اساس آن رده بندی مناسب تهیه نمود، 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 نا کارآمد گردد.

گروه دوم مشتمل بر شاخه‌هایی است که شامل کارگاه‌های استخراج یا منابع مصرف کننده هوای تهویه هستند 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، رده بندی‌هایی تدوین و بر حسب اهمیت هر رده، قابلیت اطمینان مربوط به هر شاخه محاسبه می‌شود. این رده‌ها عبارتند از:

رده I: شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای متصاعد شده از کانسنگ و لایه‌های درونگیر آن (عمدتاً در مورد کانسارهای زغال سنگ)

رده II: سقف و کف سرعت مجاز عبور هوا

رده III: شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای حاصل از مصرف مواد منفجره

رده IV: شدت جریان لازم بر اساس تعداد نفراتی که مشغول به کار هستند

۳-۷- رده بندی تغییرات شدت جریان نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده

کاربری شاخه‌های تشکیل دهنده شبکه معدن با یکدیگر تفاوت دارند. با توجه به معیار عملکرد رضایت‌بخش مورد انتظار از شاخه‌های مختلف رده‌بندی‌هایی تهیه شده است. بسته به نوع و اهمیت هر یک از این رده‌بندی‌ها محدوده مجاز تغییرات آنها تعریف شده است.

۳-۷-۱- شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای متصاعد شده از زغال سنگ و لایه-

های درونگیر آن (رده I)

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 ترقیق گاز زغال اهمیت فوق العاده‌ای داشته و در رده‌بندی شدت جریان به عنوان پر مخاطره‌ترین عامل در رده I قرار می‌گیرد. در محاسبه شبکه‌های تهویه، شدت جریانی معادل Q_1 به عنوان شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای متصاعد شده از زغال‌سنگ معرفی می‌شود. از آنجایی که Q_1 در رده I 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 (Jalali et al., 2009).

۳-۷-۲- سقف و کف سرعت مجاز عبور هوا (رده II)

سرعت هوا در قسمت‌های مختلف معدن نیز یکی دیگر از 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 ۳-۱ است.

جدول ۳-۱- مقادیر مجاز سرعت در قسمت‌های مختلف معدن (Hartman et al., 1992)

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

با در نظر گرفتن سقف و کف سرعت مجاز عبور هوا در محاسبه شبکه تهویه، Q_2 به عنوان شدت جریان مجاز معرفی می‌شود. از آنجا که این عامل در مقایسه با شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای متصاعد شده از زغال‌سنگ، از درجه اهمیت کمتری برخوردار است، بازه تغییرات آن رده II نسبت به رده I گسترده‌تر خواهد بود. بازه تغییرات رده II، ۲۰٪ در نظر گرفته شده است به این ترتیب که افزایش و یا کاهش Q_2 تنها تا ۲۰٪ مجاز خواهد بود (Jalali et al., 2009).

۳-۷-۳- شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای حاصل از مصرف مواد منفجره

(رده III)

یکی از مراحل اساسی معدنکاری زیرزمینی کندن ماده معدنی در کارگاه به منظور بارگیری و انتقال به خارج معدن می‌باشد. آتشباری سنتی‌ترین روش برای رسیدن به این هدف است. پس از خاتمه آتشباری، دودها و گازهای ناشی از آن در اثر جریان هوا به حرکت می‌افتند و در طول کار معدنی پخش می‌شوند. شدت جریان Q_p به منظور ترقیق این گازها تا حد مجاز توسط طراحان معرفی شده است شدت جریان لازم برای ترقیق گازهای حاصل از انفجار در درجه اهمیت یکسانی نسبت به Q_p در نظر گرفته شده است. بنابراین بازه تغییرات آن برابر با رده II و معادل ۲۰٪ خواهد بود (Jalali et al., 2009).

۳-۷-۴- شدت جریان لازم بر اساس تعداد نفراتی که مشغول به کار هستند (رده

(IV)

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 شده است. بنابراین بازه تغییرات (رده IV) معادل ۴۰٪ و از هر سه رده بزرگتر در نظر گرفته شده است (Jalali et al., 2009).

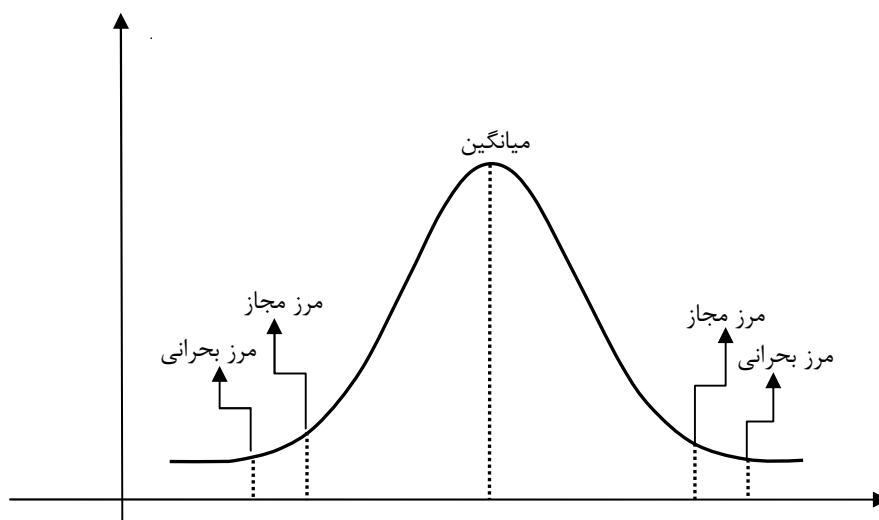
۳-۸- قابلیت اطمینان در شبکه‌های تهویه

هر چند تا کنون مطالعات بسیاری در زمینه قابلیت اطمینان شبکه‌های مختلف حمل و نقل و توزیع برق صورت گرفته است، اما از این تعاریف در شبکه‌های تهویه صحبتی به میان نیامده است. به طور کلی تحقیقات مربوط به قابلیت اطمینان، بهره‌برداران را در تخصیص منابع محدود موجود در چهار فاز مختلف به شرح زیر یاری می‌کنند (Kutz, 2003).

۱. کاهش عوارض ناشی از حوادث
۲. جلوگیری از کاهش عملکرد نامطلوب شبکه
۳. پاسخ مناسب در مواقع اضطراری
۴. بازسازی و ترمیم در مواقع بروز آسیب دیدگی

۳-۸-۱- برآورد قابلیت اطمینان در هر شاخه

از کار افتادگی در هر شاخه از یک سیستم تهویه ممکن است به صورت از کار افتادگی فاجعه‌آمیز و یا تنزل مشخصات از یک حدود معین باشد. از کار افتادگی فاجعه‌آمیز در یک شاخه پس از تنزل یا افزایش شدت جریان از مرز بحرانی تعریف شده برای آن شاخه اتفاق می‌افتد. در صورت بروز از کار افتادگی عمده در یک شاخه کل شبکه از کار خواهد افتاد. از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک حدود معین را می‌توان احتمال بین مرز مجاز و مرز بحرانی برای تغییرات شدت جریان هر شاخه تعریف کرد و این در حالی است که به هنگام بروز از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک حدود معین شاخه کاملاً نا کارآمد نشده ولی وظیفه خود را به صورت ناقص انجام می‌دهد. از آنجا که تغییرات شدت جریان هر یک از شاخه‌ها از تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کند از کار افتادگی فاجعه‌آمیز و از کار افتادگی از نوع تنزل مشخصات از یک محدوده معین از روابط (۳-۱) و (۳-۲) به دست می‌آید.



شکل ۳-۴- تابع توزیع تغییرات شدت جریان

$$Q_f^{Cr} = \begin{cases} P(Q_{max}^{Cr} < Q_i < Q_{min}^{Cr}) = 1 - \int_{Q_{min}^{Cr}}^{Q_{max}^{Cr}} f(q) dq \\ \text{otherwise} \end{cases} \quad (۱-۳)$$

همچنین:

$$Q_f^{All} = \begin{cases} P(Q_{max}^{All} < Q_i < Q_{min}^{All}) = 1 - \int_{Q_{min}^{All}}^{Q_{max}^{All}} f(q) dq \\ \text{otherwise} \end{cases} \quad (۲-۳)$$

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

۳-۸-۲- برآورد قابلیت اطمینان در شبکه‌های تهویه

در تحلیل قابلیت اطمینان شبکه‌های حمل و نقل و انتقال برق، قابلیت اطمینان معمولاً بیانگر احتمال متصل بودن گره‌های شبکه به یکدیگر است که به آن قابلیت اطمینان پایانه گفته می‌شود (Iida & Wakabayashi, 1989).

قابلیت اطمینان پایانه، احتمال وجود حداقل یک مسیر از یک مبدأ خاص به مقصدی معین را تعریف می‌کند. بر اساس این چنین تعریفی از قابلیت اطمینان 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 اطمینان شاخه یک است هر گاه به طور صحیح کار کند و صفر است هر گاه آن شاخه به صورت مطلوب کار نکند. نقطه ضعف این معیار برای پیاده سازی 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 اطمینان شبکه تهویه دخالت داد. بنابراین برای تحلیل قابلیت اطمینان 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 پایان نامه روشی ارائه می‌شود که در آن پس از تعریف قابلیت اطمینان شاخه‌ها، قابلیت اطمینان 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- حد بالای قابلیت اطمینان هر یک از شاخه‌ها، احتمال وقوع حالتی را نشان می‌دهد که در آن شدت جریان هر یک از شاخه‌ها بین مرزهای بحرانی تعریف شده باشد.

۳- حد پایین قابلیت اطمینان 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.

۴- قابلیت اطمینان شبکه‌ای که دارای حداقل یک شاخه با قابلیت اطمینان صفر باشد، صفر است.

۵- برای یافتن قابلیت اطمینان شبکه‌ای که در آن هیچ شاخه‌ای با قابلیت اطمینان صفر وجود ندارد مقدار کمینه‌ی حاصل ضرب قابلیت اطمینان 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.

۳-۸-۳- نمودار بلوکی و شناسایی مجموعه‌های انقطاع

قبل از کاربرد شیوه‌های تحلیل شبکه‌ها برای ارزیابی قابلیت اطمینان آنها ضرورتاً باید درک کاملی از روابط میان سیستم‌ها و مدل‌سازی شبکه برای آن حاصل شود. طبق تعریف مجموع انقطاع عبارت از مجموعه‌ای از عضوهای سیستم است که شکست آنها سبب شکست سیستم می‌شود.

روش‌های گوناگونی برای شناسایی مجموعه‌های انقطاع وجود دارد که یکی از روش‌های شناسایی مجموعه‌های انقطاع در ۳-۳-۲-۲ آورده شده است. هدف از شناسایی مسیرهای انقطاع در یک شبکه تهیه به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم، اطمینان از کارآمد بودن مجموعه‌های کمترین عضوهایی که حالت‌های شکست سیستم را به وجود می‌آورند است تا از این طریق بتوان قابلیت اطمینان کل شبکه را به دست آورد.

۳-۸-۴- الگوریتم دیکسترا

در نظریه گراف، الگوریتم دیکسترا یکی از الگوریتم‌های پیمایش گراف است که توسط دانشمند هلندی علوم رایانه، *دِسْخِر دِیکْسترا* در سال ۱۹۵۹ ماتریس شد (Dijkstra, 1959).

این الگوریتم یکی از الگوریتم‌های پیمایش گراف است که مسأله کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ واحد را برای گراف‌های وزن‌داری که یال با وزن منفی ندارند، حل می‌کند و در نهایت با ایجاد درخت کوتاه‌ترین مسیر، کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ به همه رأس‌های گراف را به دست می‌دهد. هم‌چنین

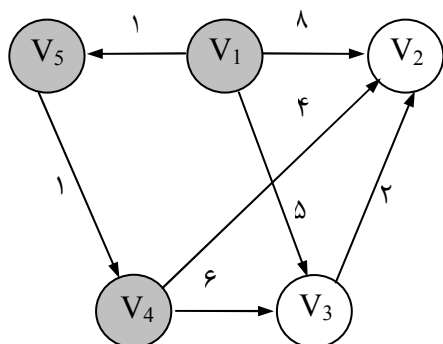
می‌توان از این الگوریتم برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ تا رأس مقصد به این ترتیب بهره جست که در حین اجرای الگوریتم به محض پیدا شدن کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ به مقصد، الگوریتم را متوقف کرد.

خط‌مشی الگوریتم دیکسترا، مشابه با روش حریصانه استفاده شده در الگوریتم پریم برای پیدا کردن زیر درخت فراگیر بهینه است (کرم‌ن و همکاران ۱۳۸۵).

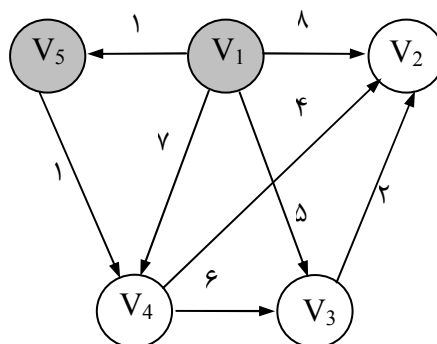
۳-۸-۵- ارائه الگوریتم دیکسترا برای تحلیل شبکه‌های معدنی

الگوریتم دیکسترا برای حل مسائل بهینه‌سازی و یافتن سریع‌ترین مسیر در یک گراف از یک رأس به سایر رؤس 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 (کرم‌ن و همکاران ۱۳۸۵). در روش مبتنی بر الگوریتم دیکسترا ابتدا مجموعه V که مشتمل بر تمام رؤس گراف است، انتخاب می‌شود. سپس دو مجموعه تهی، یکی به صورت زیرمجموعه‌ای تهی از یال‌ها، به نام F و دیگری زیرمجموعه‌ای تهی از رؤس، به نام Y تعریف می‌شوند. برای مقداردهی اولیه به مجموعه Y رأسی به صورت دلخواه انتخاب می‌شود. سپس کوتاه‌ترین مسیر بین آن رأس و سایر رؤس مشخص می‌شود (Dijkstra, 1959). برای مثال بر روی گراف نشان داده شده در شکل ۳-۵-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 (V_1V_5) نیز به مجموعه F اضافه می‌شود. سپس مسیرهایی از V_1 به رؤس موجود در مجموعه $V-Y$ (بخوانید مجموعه V منهای Y) مورد بررسی قرار می‌گیرند. بر این اساس، مسیر $(V_1V_5V_4)$ از بین مسیرهای محتمل به عنوان سریع‌ترین مسیر برگزیده می‌شود. این مسیر در شکل ۳-۵-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

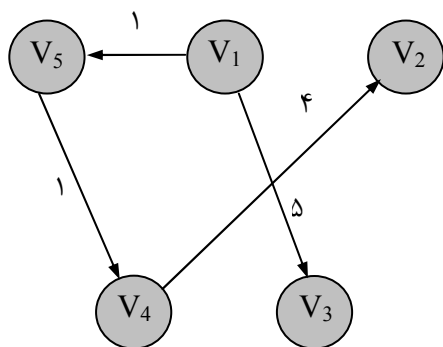
برگیرد، یعنی (V_5V_4) ، به مجموعه F افزوده و سایر یال‌هایی که به آن رأس ختم می‌شوند، حذف می‌شوند (شکل ۵-۳-ب).



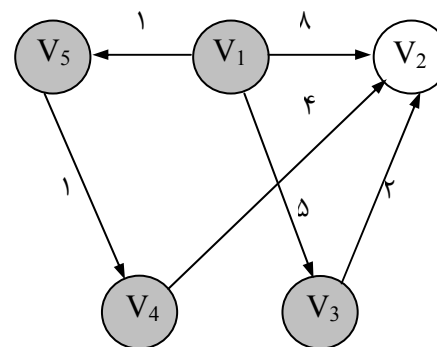
ب



الف



د



ج

شکل ۵-۳- 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 شامل یال‌های موجود بر روی مسیر متناظر با سریع‌ترین مسیر است. این مراحل در شکل‌های ۵-۳-ج و ۵-۳-د نشان داده شده است. به منظور کاربرد الگوریتم دیکسترا برای محاسبه قابلیت اطمینان مربوط به شبکه‌های تهویه حاصل ضرب قابلیت اطمینان مربوط به هر مسیر تعیین کننده قابلیت اطمینان آن مسیر است. بنابراین در روش مبتنی بر این الگوریتم تمام مسیرها بین گره ورودی هوا و خروجی هوا شناسایی می‌شود و می‌توان قابلیت اطمینان مربوط به هر یک از مسیرهای شناسایی شده را از حاصل ضرب قابلیت اطمینان شاخه‌ها تشکیل دهنده آن مسیر محاسبه نمود.

بر اساس یک انتخاب محافظه کارانه کمترین مقدار به دست آمده به عنوان قابلیت اطمینان کل

شبکه معرفی می شود.

فصل چہارم

برآورد قابلیت اطمینان شبکه تہویہ معدن تخت

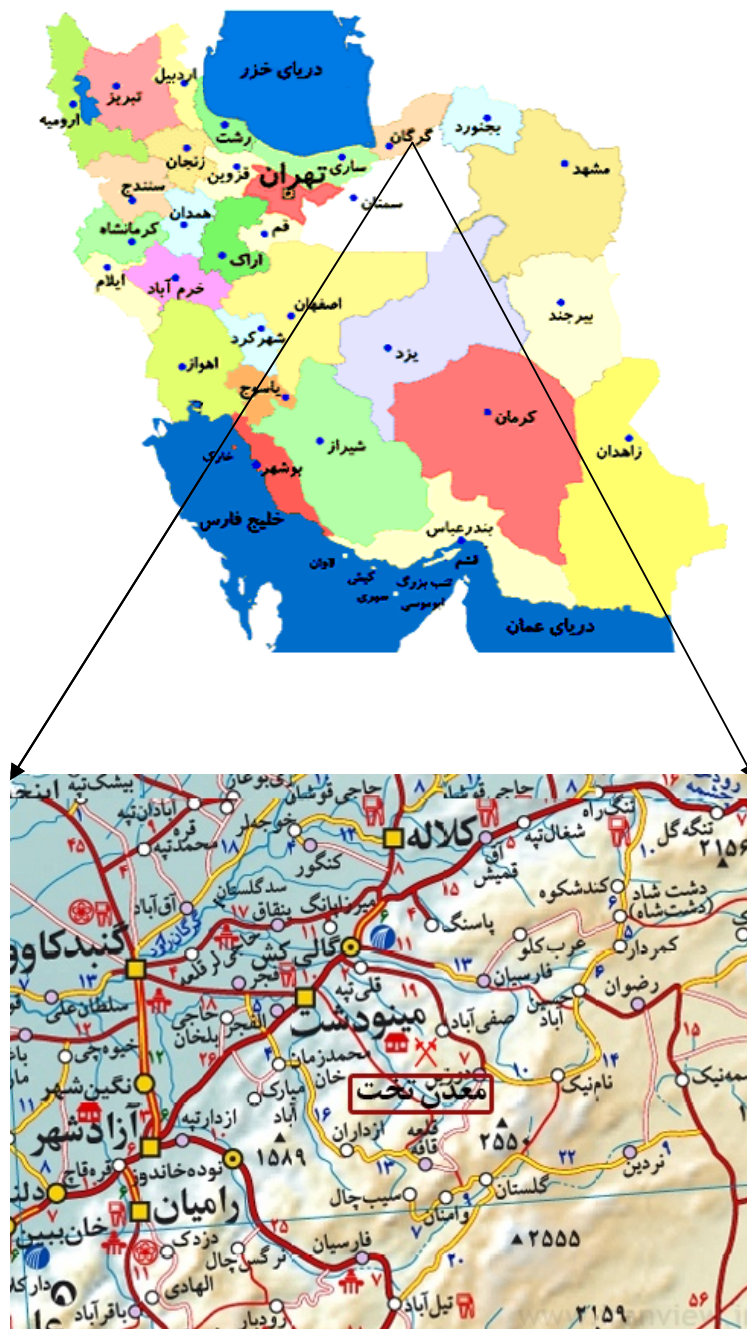
۴-۱- معرفی معدن زغال سنگ تخت

منطقه تخت در ۱۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مینو دشت واقع شده است. بر اساس گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی (۱۳۷۱) مشخصات و نام هر یک از لایه‌های این معدن به صورت زیر می‌باشد.

لایه K_8 : این لایه با گسترش امتدادی ۶/۵ کیلومتر، به ۸ بلوک مجزا تقسیم می‌شود که ضخامت متوسط آنها از ۰/۵۲ تا ۱/۵ متغیر است. همه لایه‌ها دارای شیب بین ۳۰ تا ۲۵ درجه می‌باشند که ذخیره کل این لایه حدود ۶ میلیون تن برآورد شده است.

لایه K_{10} : این لایه با گسترش امتدادی ۱۰/۵۸ کیلومتر به ۱۲ بلوک مجزا تقسیم می‌شود که ضخامت متوسط آنها ۰/۹ تا ۲/۳۸ متر متغیر است. همه لایه‌ها دارای شیب ۲۵ تا ۳۵ درجه می‌باشند که ذخیره کل این لایه حدود ۹ میلیون تن برآورد شده است.

لایه K_{11} : این لایه با گسترش امتدادی ۷ کیلومتر، به ۸ بلوک مجزا تقسیم می‌شود که ضخامت متوسط آنها از ۰/۸۲ تا ۱/۴۳ متر متغیر است. همه لایه‌ها دارای شیب ۱۷ تا ۳۵ درجه می‌باشند که ذخیره کل این لایه حدود ۱۰ میلیون تن برآورد شده است.



شکل ۴-۱- موقعیت جغرافیایی معدن تخت

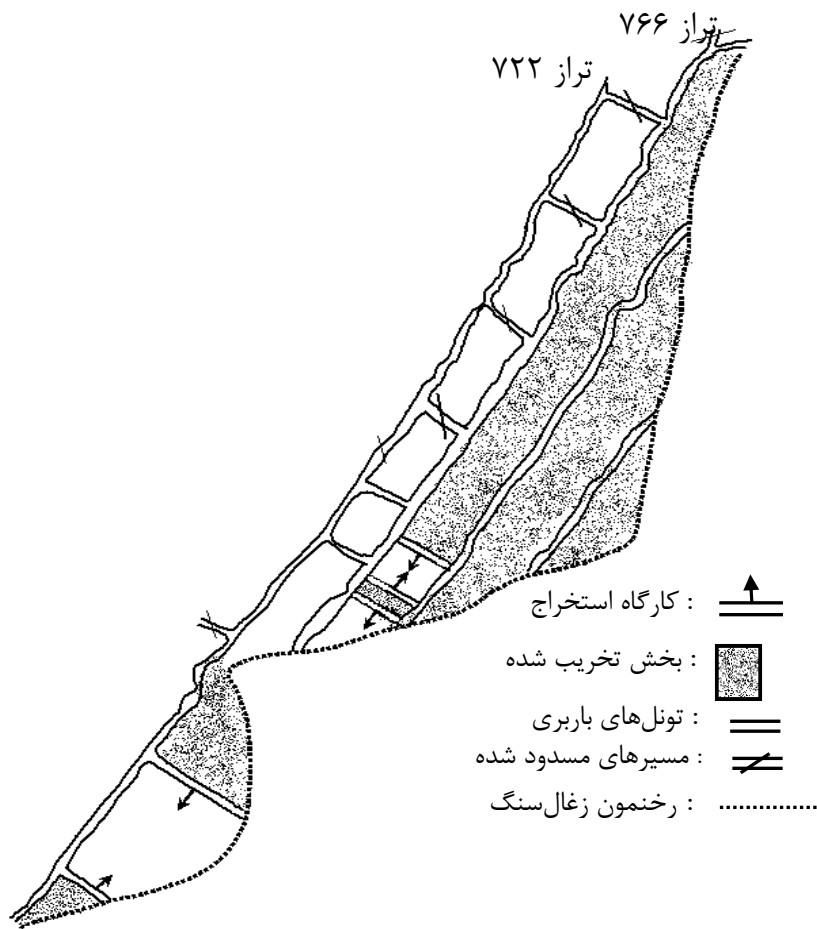
لایه K_{17} : این لایه با گسترش امتدادی $\frac{3}{5}$ کیلومتر، به ۴ بلوک مجزا تقسیم می‌شود که ضخامت متوسط آنها از $\frac{0}{79}$ تا $\frac{1}{07}$ متر متغیر است. همه لایه‌ها دارای شیب 250° تا 350° درجه می‌باشند. این لایه دارای درصد خاکستر بالایی می‌باشد. ذخیره کل این لایه حدود ۶ میلیون تن برآورد شده است.

لایه K_{19} : این لایه با گسترش امتدادی ۴/۵ کیلومتر، به ۱۱ بلوک مجزا تقسیم می‌شود که ضخامت متوسط آنها از ۰/۹ تا ۲/۲۹ متر متغیر است. همه لایه‌ها دارای شیب ۲۷ تا ۳۵ درجه می‌باشند. ذخیره کل این لایه حدود ۹ میلیون تن محاسبه شده است.

لایه K_7 : این لایه با گسترش امتدادی ۵/۲۵ کیلومتر، به ۶ بلوک مجزا تقسیم می‌شود که ضخامت متوسط آنها از ۰/۴۹ تا ۰/۶۱ متر متغیر است. همه لایه‌ها دارای شیب ۲۶ تا ۳۲ درجه می‌باشند که ذخیره کل این لایه حدود ۴ میلیون تن برآورد شده است.

به علت پر شیب بودن لایه‌های زغال، در کارگاه‌های مختلف معدن تخت، عمدتاً از روش پلکانی معکوس برای احداث کارگاه استخراج استفاده می‌شود. طول پله به طور متوسط ۱۰ متر و عرض آن ۰/۸ تا ۱ متر است. در معدن برای آماده‌سازی و دسترسی به لایه‌ها چهار تونل اصلی احداث شده است که تونل‌های بازکننده آنها با شماره‌های ۱، ۲، ۳، ۴ نام‌گذاری شده‌اند. فاصله تونل‌ها در جهت شیب تقریباً ۸۰ متر است. 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 سیستم فولادی از نوع قاب می‌باشد. همچنین استخراج در کارگاه‌های معدن توسط پیکور انجام می‌شود.

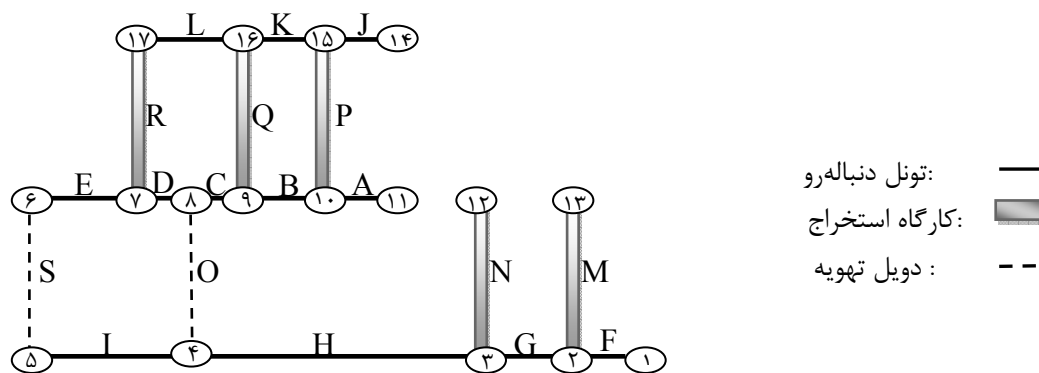
شبکه معدن زغال سنگ تخت در حال حاضر، مطابق شکل ۴-۲، شامل ۵ کارگاه استخراج، ۳ کارگاه بین تراز ۷۶۶+ و سطح زمین و ۲ کارگاه بین ترازهای ۷۶۶+ و ۷۲۲+ است. معدن در ۳ شیفت متوالی کار می‌کند در ۲ شیفت اول عملیات استخراجی در کارگاه‌ها صورت می‌گیرد. انتقال مواد معدنی استخراج شده طی سیکل باربری توسط ۱۲ واگن در یک شیفت انجام می‌شود. ظرفیت وزنی هر واگن ۱/۲۸ تن، سرعت آن ۱/۷ متر بر ثانیه و زمان بارگیری و تخلیه به ترتیب ۲ و ۱ دقیقه است. سطح مقطع لکوموتیو ۱/۲×۱ مترمربع بوده و ضریب مقاومت مانع با توجه به شکل مقطع واگن ۰/۸ می‌باشد.



شکل ۲-۴- شبکه تهویه فعلی معدن زغال سنگ تخت (ربیع نژاد و همکاران، ۱۳۸۷)

۲-۴- مدل سازی شبکه تهویه به صورت یک گراف

برای مدل سازی و شبیه سازی حرکت قطار و محاسبه قابلیت اطمینان شبکه تهویه، نخست مدل گرافی معدن تهویه و پس از محاسبه شبکه، مدل سازی مربوط به آن صورت می گیرد. در این تحقیق شبکه تهویه مربوط به معدن زغال سنگ تخت که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است مورد بررسی قرار گرفته است. پهنه های استخراج شده و تخریب شده نیازی به هوارسانی نداشته بنابراین از شبکه گرافی معدن حذف شده اند. به این ترتیب شبکه گرافی مربوط به معدن زغال سنگ تخت مطابق شکل ۳-۴ ایجاد شده است.



شکل ۴-۳- شبکه گرافی مربوط به معدن تخت

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)

۴-۳- تحلیل شبکه تهویه معدن تخت

در تحلیل قابلیت اطمینان شبکه تهویه کلیه پارامترهای شبکه از جمله مقاومت و شدت جریان مربوط به شبکه باید محاسبه شود.

۴-۳-۱- محاسبه مقاومت ناشی از اصطکاک

مقاومت ناشی از اصطکاک عمدتاً در نتیجه اصطکاک ذرات هوا با دیواره کار معدنی تولید می‌شود. و مقاومت ناشی از 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، تردد افراد در 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 کارهای معدنی می‌باشد. در این تحقیق برای اعمال این مقاومت ۲۰٪ به مقاومت ناشی از اصطکاک هر یک از شاخه‌ها اضافه شده است. ضرایب α مربوط به بخش‌های مختلف معدن در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱- ضرایب اصطکاک مربوط به بخش‌های مختلف (ربیع‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۷)

α	مشخصات کار معدنی
۰/۰۰۱۹	تونل‌های دنباله رو زغال
۰/۰۰۳	تونل‌های عبور هوا حفر شده در زغال
۰/۰۰۴۵	کارگاه‌های استخراج

با توجه به شکل ۳-۴ کلیه مسیرهای شبکه تهویه تخت به همراه طول متناظر با هر یک از مسیرها و مقاومت اصطکاکی آنها در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲- مشخصات شاخه‌های شبکه تهویه تخت

شماره کار معدنی	گره آغازین	گره انتهایی	نوع کار معدنی	طول (متر)	پیرامون (متر)	سطح مقطع (متر مربع)	ضریب اصطکاک (α)	مقاومت اصطکاکی (مورگ)
۱	۱۱	۱۰	تونل	۸۳	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۱۰
۲	۲	۱۳	کارگاه	۸۳	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵	۶۹۴
۳	۷	۱۷	کارگاه	۸۷	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵	۷۲۶
۴	۹	۱۶	کارگاه	۸۷	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵	۷۲۶
۵	۱۰	۱۵	کارگاه	۸۷	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵	۷۲۶
۶	۳	۱۲	کارگاه	۸۳	۵/۱	۱/۴	۰/۰۰۴۵	۶۹۴
۷	۱۰	۹	تونل	۲۸	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۳
۸	۹	۸	تونل	۳۹	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۵
۹	۸	۷	تونل	۱۱۳	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۱۳
۱۰	۸	۴	دویل تهویه	۱۳۰	۶	۲/۲	۰/۰۰۳	۲۰۵

ادامه جدول ۲-۴

شماره کار معدنی	گره آغازین	گره انتهایی	نوع کار معدنی	طول (متر)	پیرامون (متر)	سطح مقطع (متر مربع)	ضریب اصطكاك (α)	مقاومت اصطكاكی (مورگ)
۱۱	۷	۶	تونل	۳۹	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۵
۱۲	۶	۵	دویل تهویه	۱۳۱	۶	۲/۲	۰/۰۰۳	۲۰۸
۱۳	۵	۴	تونل	۱۵۲	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۱۸
۱۴	۴	۳	تونل	۴۷۵	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۵۶
۱۵	۳	۲	تونل	۴۰	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۵
۱۶	۲	۱	تونل	۴۷	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۶
۱۷	۱۷	۱۶	تونل	۳۶	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۴
۱۸	۱۶	۱۵	تونل	۲۴	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۳
۱۹	۱۵	۱۴	تونل	۱۸	۷/۸	۵	۰/۰۰۱۹	۲

۴-۳-۲- محاسبه مقاومت ناشی از حضور قطار

حرکت قطار در تونل مقاومتی از جنس مقاومت ناشی از موانع اعمال می‌کند. افزایش مقاومت تأثیر مستقیم بر شدت جریان شاخه‌ای که قطار در آن واقع است و در نتیجه شدت جریان سایر شاخه‌ها و کل شبکه دارد. به ازای حرکت قطار در هر بخش از تونل برای هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه شدت جریان جدیدی تولید خواهد شد. این افت از رابطه (۴-۱) قابل محاسبه است (Hall, 1981).

که در آن

C: مقاومت آئرو دینامیک (۰/۸)

$$R_m = \frac{c\gamma}{2g(s - s_m)^3} s_m \quad (4-1)$$

γ : وزن مخصوص هوای استاندارد (کیلوگرم بر متر مکعب)

g: شتاب گرانشی (متر بر مجذور ثانیه)

S: سطح مقطع کار معدنی (مترمربع)

s_m : سطح مقطع مانع (مترمربع)

۴-۴-۳- محاسبه شدت جریان

شدت جریان هر یک از شاخه‌ها با مشخص بودن مقاومت مربوط به هر یک از آن‌ها توسط نرم‌افزار تهویه^۱ نوریان محاسبه شده است. مشخصات مربوط به فن استفاده شده در شبکه مطابق با جدول ۴-۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۳- مشخصات فن شبکه تهویه معدن تخت

شماره نقطه عملکردی	شدت جریان (مترمکعب بر ثانیه)	فشار (میلی‌متر آب)
۱	۵۰	۲۰
۲	۴۰	۳۰
۳	۲۰	۳۵

پس از محاسبه شبکه تهویه توسط نرم افزار تهویه در شرایط عادی (عدم حضور قطار در تونل) شدت جریان مربوط به هر یک شاخه‌ها مطابق جدول ۴-۴ بدست آورده شده است.

جدول ۴-۴- شدت جریان شاخه‌های مربوط به شبکه تخت

شماره کار معدنی	نوع کار معدنی	شدت جریان (مترمکعب بر ثانیه)	مقاومت تصحیح شده با منظور کردن افت‌های موضعی 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	دویل تهویه	۵/۵	۲۳۵/۵
۱۱	تونل	۴/۷	۵/۳
۱۲	دویل تهویه	۴/۷	۲۳۸/۲

^۱ TAHVI

ادامه جدول ۴-۴

شماره کار معدنی	نوع کار معدنی	شدت جریان (مترمکعب بر ثانیه)	مقاومت تصحیح شده با منظور کردن افت‌های موضعی و موانع (مورگ)
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

۴-۴- مدل‌سازی حرکت قطارها

عملیات باربری در تونل‌های دنباله‌رو برای انتقال مواد معدنی استخراج شده در شیفت پایانی انجام می‌شود. دو قطار در دو تراز مختلف موظف هستند که در یک سیکل رفت و برگشت هر یک از کارگاه‌ها را تخلیه نمایند. به دلیل وجود سه کارگاه در تونل واقع در تراز ۷۶۶+ (تونل شماره ۲) در طول شیفت باربری قطار در این تونل، سه سیکل باربری داشته و به طور مشابه به دلیل وجود ۲ کارگاه در تونل واقع در تراز ۷۲۲+ (تونل شماره ۱)، در این فرض دو سیکل باربری وجود خواهد داشت. از آغاز حرکت قطار به منظور رسیدن به کارگاه استخراج و بارگیری مواد استخراج شده تا تخلیه واگن‌ها، قطار در بخش‌های مختلف تونل در حرکت است. احتمال حضور قطار در هر یک از بخش‌های تونل و شدت جریان اعمال شده به کل شبکه مربوط به حالت‌های مختلف حضور، قطار اطلاعاتی در اختیار قرار خواهد داد که توسط آن تابع توزیع تغییرات شدت جریان مربوط به هر شاخه قابل محاسبه می‌باشد. بنابراین برای بدست آوردن احتمال حضور قطار در هر یک از بخش‌های تونل ابتدا تابع توزیع احتمال توأم حرکت قطارها و سپس تابع متغیرهای تصادفی مربوط به زمان شروع هر سیکل در طول شیفت باربری محاسبه خواهد شد.

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

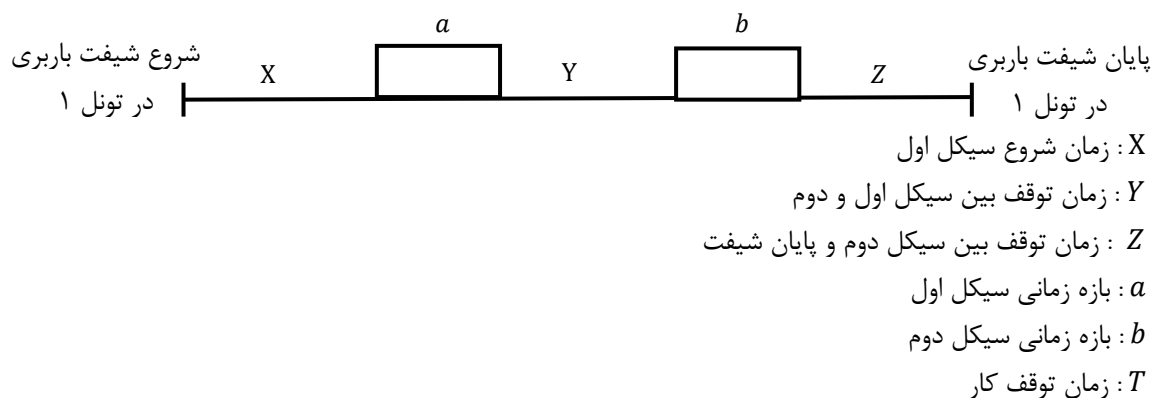
متناهی از متغیرهای تصادفی تعمیم داد. یک تابع دو متغیره با مقادیر $f(x, y)$ ، که روی صفحه xy تعریف شده است، تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای تصادفی x و y خوانده می‌شود؛ اگر و فقط اگر برای هر ناحیه A از صفحه xy شرایط زیر برقرار باشد (فرونند و همکاران ۱۳۷۱).

$$P[(x, y) \in A] = \int \int_A f(x, y) dx dy \quad (۲-۴)$$

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.

$$\begin{aligned} f(x, y) &\geq 0 \\ -\infty < y < +\infty \\ -\infty < x < +\infty \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dx dy &= 1 \end{aligned} \quad (۳-۴)$$

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



شکل ۴-۴ بازه زمانی مربوط به حرکت قطار در تونل یک

در این شرایط:

$$X + a + Y + b + Z = ۶ - (\text{زمان تخلیه})$$

$$T = X + Y + Z = ۶ - a - b - (\text{زمان تخلیه})$$

در صورت اطلاع دقیق از مقادیر X و Y می‌توان مقدار Z را بدست آورد. بنابراین Z ماهیت تصادفی

نداشته و می‌توان آن را از مسأله خارج کرد متغیر تصادفی X دارای چگالی یکنواخت است، و به آن

متغیر تصادفی یکنواخت پیوسته اطلاق می‌شود، اگر و فقط اگر چگالی احتمال آن به صورت رابطه (۴-۴) باشد (فروند و همکاران ۱۳۷۱).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta - \alpha} & \alpha < x < \beta \\ 0 & \text{سایر نقاط} \end{cases} \quad (4-4)$$

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 (۴-۳) نتایج زیر حاصل می‌شود:

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

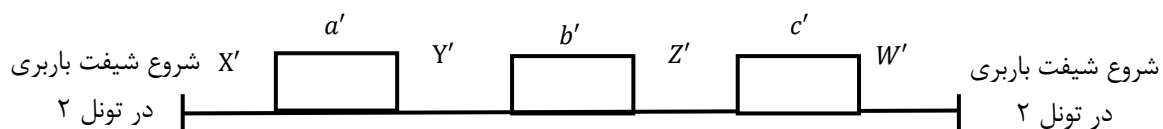
$$0 < X < T, 0 < Y < T, 0 < X + Y < T$$

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

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

آنگاه:

مطابق شکل ۴-۵، همین منطق و تحلیل را می‌توان برای تونل ۲ کاملاً مشابه با روابط ارائه شده برای تونل ۱ ارائه نمود.



شکل ۴-۵- بازه زمانی مربوط به حرکت قطار 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:

$$K' = \frac{T'^3}{6}$$

۴-۴-۱- توابع متغیرهای تصادفی مربوط به زمان شروع هر سیکل

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

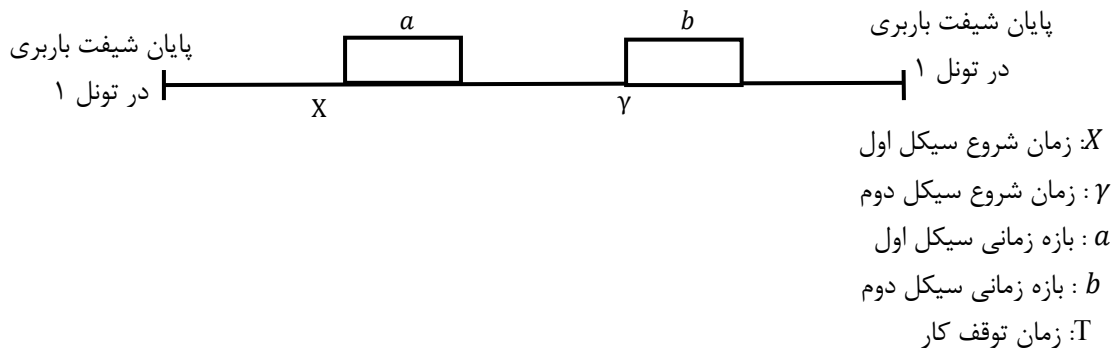
روش تابع توزیع یکی از روش‌های بدست آوردن تابع چگالی یک یا چند متغیره از تابع توزیع توأم همان متغیرها است. روش فوق روشی سراسر است بوده به این طریق که ابتدا تابع توزیع متغیر مورد نظر محاسبه شده و سپس با مشتق‌گیری از آن تابع چگالی بدست خواهد آمد (جان فروند و همکاران ۱۳۷۱).

$$F(y) = P(y \leq y) = P(y(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq y) \quad (۴-۵)$$

و برای تعیین چگالی احتمال آن باید معادله زیر را حل کرد.

$$f(y) = \frac{dF(y)}{dy} \quad (۴-۶)$$

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



شکل ۴-۶- زمان شروع هر یک از سیکل‌ها در تونل

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.

$$f(X) = \frac{1}{K} \int_0^{T-X} dy = \frac{1}{K} (T - X) \quad (۷-۴)$$

بنابراین

$$f(X) = \begin{cases} \frac{1}{K} (T - X) & 0 < X < T \\ 0 & \text{سایر نقاط} \end{cases} \quad (۸-۴)$$

سیکل دوم پس از پایان سیکل اول و استراحت بین دو سیکل آغاز می‌شود، بنابراین γ که زمان شروع سیکل دوم است، 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 (Y) شروع می‌شود. اکنون تابع متغیرهای تصادفی مربوط به زمان شروع سیکل دوم مطابق با فرمول (۹-۴) به شرح زیر قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} \gamma &= x + y + a \quad a < \gamma < T + a \\ F(\gamma) &= P(\gamma \leq \gamma) = P(x + y + a \leq \gamma) = P(x + y \leq \gamma - a) \\ F(\gamma) &= \frac{1}{K} \int_0^{\gamma-a} \int_0^{\gamma-a-x} dx dy = \frac{1}{2K} (\gamma - a)^2 \end{aligned} \quad (۹-۴)$$

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

$$(F(\gamma))' = f(\gamma) = \frac{1}{K}(\gamma - a) \quad (10-4)$$

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

$$(F(\gamma))' = f(\gamma) = \frac{1}{K}(\gamma - a) \quad (11-4)$$

تابع متغیرهای تصادفی مربوط به زمان‌های شروع هر سه سیکل باربری در تونل دوم نیز مطابق آنچه برای تونل اول به دست آمده قابل محاسبه می‌باشد. بنابراین زمان شروع سیکل اول X' مطابق رابطه (12-4) می‌باشد.

$$f(X') = \frac{1}{K'} \int_{\cdot}^{T'-X'} \int_{\cdot}^{T'-X'-Y'} dy dz \quad (12-4)$$

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

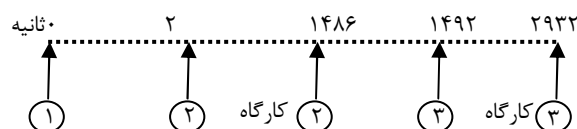
$$(F(\gamma'))' = f(\gamma') = \frac{\gamma' - a'}{K'}(T' - (\gamma' - a')) \quad (13-4)$$

به همین ترتیب تابع توزیع احتمال و تابع چگالی احتمال زمان شروع سیکل سوم عبارتند از:

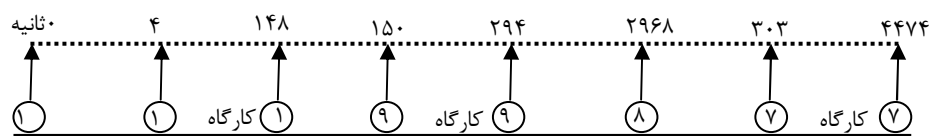
$$(F(\theta'))' = f(\theta') = \frac{1}{2K'}(\theta' - (a' + b'))^2 \quad (14-4)$$

۴-۴-۲- زمان‌بندی حرکت و محاسبه احتمال حضور قطار در تونل‌های ۱ و ۲

با توجه به زمان‌سنجی انجام شده و با در نظر گرفتن سرعت قطار و طول تونل‌هایی که قطار برای رسیدن به کارگاه‌های استخراج باید طی کند و همچنین زمان لازم جهت بارگیری هر یک از واگن‌ها برنامه زمانی حرکت قطار در هر یک از تونل‌های ۱ و ۲ به صورت شکل ۴-۷ می‌باشد.

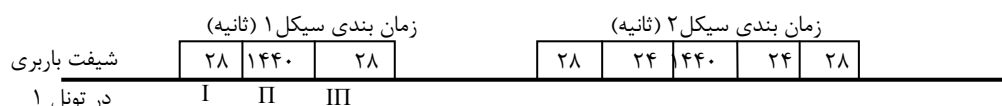


الف برنامه زمانی حرکت قطار در تونل ۱

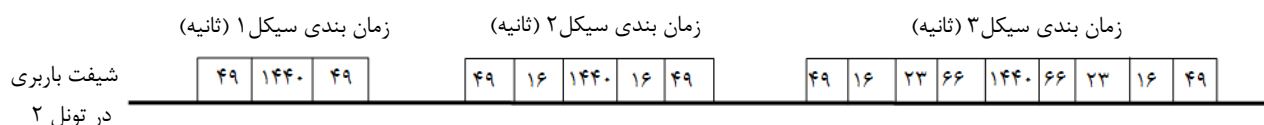


ب برنامه زمانی حرکت قطار در تونل ۲
 شکل ۴-۷- برنامه زمان بندی حرکت قطارها

زمان بندی مربوط به هر سیکل در دو تونل در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۸ اگر قطار در تونل ۱ در اولین بخش از سیکل اول (I) باشد قطار در تونل ۲ ممکن است در هر یک از ۱۷ حالت محتمل برای حضور قطار در تونل ۲ باشد.



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



ب برنامه زمان بندی قطار در هر یک از سه سیکل در تونل ۲
 شکل ۴-۸- برنامه زمان بندی قطار در هر یک از دو سیکل

مقاومت ناشی از حرکت قطار 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 ۴-۸- الف، در تونل ۱ لکوموتیو تا رسیدن به کارگاه استخراج اول ۲۸ ثانیه در حرکت خواهد بود (بخش I) پس از آن ۱۴۴۰ ثانیه به منظور بارگیری مواد استخراج شده در شاخه ۱-۲ (شکل ۴-۳) توقف خواهد داشت (بخش II). 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 در هر سه حالت فوق تنها بر یک شاخه اعمال خواهد شد، پس در تونل ۱ با این فرض می توان تعداد حالات حضور قطار 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.

به منظور محاسبه احتمال حضور قطار، ۴۴ حالت وجود خواهد داشت (شکل ۴-۹) که با داشتن زمان توابع چگالی مربوط به زمان‌های شروع هر یک از سیکل‌ها می‌توان احتمال هر یک از حالات را بر اساس روابط ارائه شده به دست آورد.

برای مثال به منظور محاسبه احتمال حضور هم‌زمان قطار در شاخه‌های (۱-۲) و (۱۰-۱۱) مراحل انجام کار به صورت زیر می‌باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده سیکل اول باربری در تونل ۲، ۱۵۳۸ ثانیه طول خواهد کشید. اگر x' زمان شروع سیکل اول در تونل ۲ باشد بنابراین قطار در تونل ۲ در بازه زمانی $1538 < x' < [2]$ حتماً در شاخه ۱۰-۱۱ خواهد بود. به طور مشابه سیکل اول در تونل اول نیز ۱۴۹۶ ثانیه خواهد بود (۴۹ ثانیه حرکت رفت در شاخه ۱-۲، ۱۴۴۰ ثانیه زمان پر شدن واگن‌ها در زیر کارگاه استخراج و ۴۹ ثانیه مسیر بازگشت در شاخه ۱-۲) بنابراین اگر x زمان سیکل اول در تونل اول باشد، قطار در بازه $1496 < x < [1]$ حتماً در شاخه ۱-۲ خواهد بود.

تابع توزیع احتمال زمان‌های شروع سیکل اول مربوط به تونل‌های ۱ و ۲ مطابق با روابط (۴-۸) و (۴-۱۲) محاسبه شده است. از آنجا که این دو پیشامد کاملاً مستقل از یکدیگر هستند احتمال توزیع هم‌زمان آنها از حاصل ضرب تابع توزیع زمان شروع هر یک از دو سیکل به دست خواهد آمد. بنابراین:

$$f(x, x') = f(x) \cdot f(x')$$

به منظور محاسبه احتمال حضور هم‌زمان قطارها در دو تونل به‌طور کلی دو حالت ممکن است روی دهد.

حالت اول: به محض ورود قطار به تونل اول، قطار در تونل ۲ حضور داشته باشد در این حالت روابط زیر برقرار است.

$$x' < x < x' + 1538 \Rightarrow 0 < x - x' < 1538 \Rightarrow \begin{cases} x = x' \\ x = x' + 1538 \end{cases}$$

زمان توقف کار در تونل‌ها به منظور تعیین حدود انتگرال‌گیری در زیر محاسبه شده است.

زمان توقف در تونل ۱:

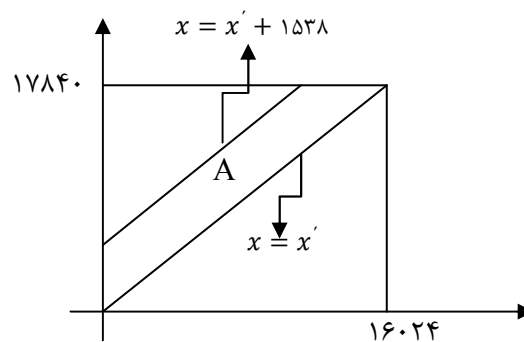
$$T = X + Y + Z = 6 - a - b - (\text{تخلیه زمان}) = 6 \times 60 \times 60 - 1496 - 1544 - 720 = 17840$$

زمان توقف در تونل ۲:

$$T' = X' + Y' + Z' + W' = 6 - a' - b' - c' - (\text{تخلیه زمان}) = 6 \times 60 \times 60 - 1538 - 1570 - 1748 - 1080 = 16024$$

بنابراین با استفاده از روابط به دست آمده و مرزهای تعیین شده حدود انتگرال گیری کاملاً مشخص خواهد شد.

بنابراین احتمال حالت اول برابر خواهد بود با:



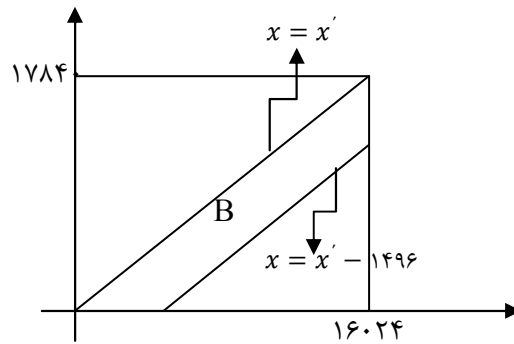
شکل ۹-۴- حدود انتگرال گیری به منظور محاسبه احتمال حضور همزمان قطار در شاخه‌های (۱-۲) و (۱۰-۱۱)

$$\int_0^{16024} \int_0^{x'+1538} f(x, x') dx' dx = \int_0^{16024} \int_0^{x'+1538} f(x) \cdot f(x') dx' dx$$

حالت دوم: به محض ورود قطار به تونل ۲، قطار در تونل ۱ حضور داشته باشد که در این حالت رابطه زیر برقرار است.

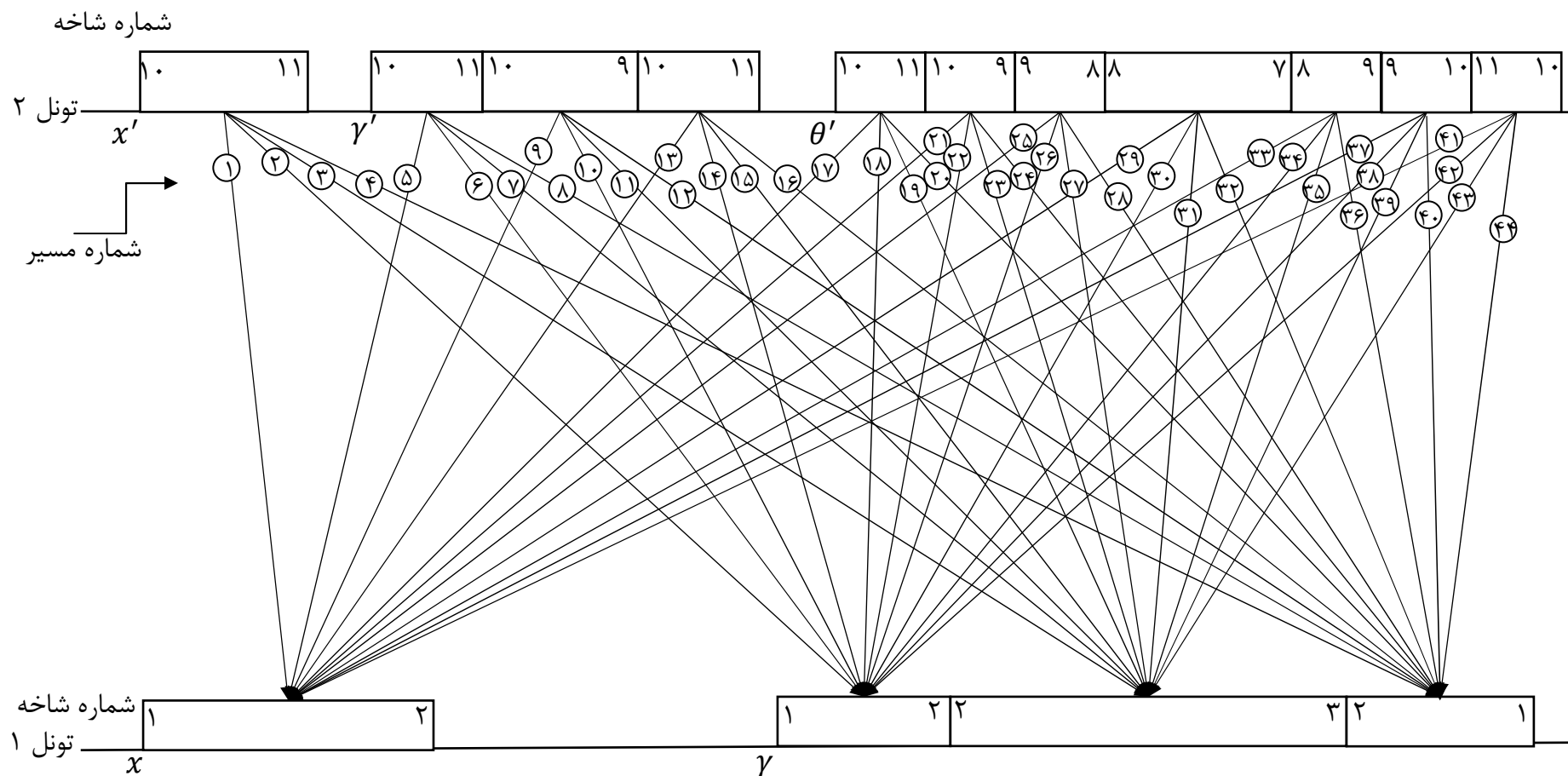
$$x < x' < x + 1496 \Rightarrow 0 < x' - x < 1496 \Rightarrow \begin{cases} x = x' \\ x = x' - 1496 \end{cases}$$

با توجه به زمان‌های توقف کار T و T' که در حالت قبل محاسبه شد حدود انتگرال‌گیری برای حالت دوم برابر خواهد بود با:



شکل ۴-۱۰- حدود انتگرال‌گیری به منظور محاسبه احتمال حضور هم‌زمان قطار در شاخه‌های (۱-۲) و (۱۰-۱۱)

$$\int_{.}^{16024} \int_{.}^{x'-1496} f(x, x') dx' dx = \int_{.}^{16024} \int_{.}^{x'-1496} f(x) \cdot f(x') dx' dx$$



شکل ۴-۱۱- حالات مختلف حضور هم زمان قطار در هر یک از تونل‌های باربری در هر دو تونل

جدول ۴-۵- احتمال مربوط به حضور هم زمان قطار در هر یک از بخش‌های تونل‌های باربری

شماره شاخه	مجموع حالات احتمال همزمان حضور قطار در شاخه-های مزبور	احتمال حضور قطار
(۱-۲)، (۱۰-۱۱)	۴۴،۴۲،۴۱،۳۰،۱۸،۱۷،۱۶،۱۴،۱۳،۸،۶،۵،۴،۲،۱	۰/۳۴۹۸
(۱-۲)، (۲-۳)، (۱۰-۱۱)	۴۳،۱۹،۱۵،۷،۳	۰/۰۴۹۵
(۱-۲)، (۱۰-۹)	۳۹،۳۷،۳۶،۲۴،۲۲،۲۱،۱۲،۱۰،۹	۰/۱۰۷۶۳
(۱-۲)، (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

۴-۴-۳- محاسبه قابلیت اطمینان هر یک از شاخه‌ها

توزیع نرمال (توزیع گوسی) از مهمترین و متداول‌ترین توزیع‌های مورد استفاده در علم آمار و احتمال است و در ارزیابی قابلیت اطمینان کاربردهای مهمی دارد.

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

احتمال حضور قطار در بخش‌های مختلف مسیر باربری برای تمامی شاخه‌های مربوط به شبکه تهویه معدن تخت در طول ۳ شیفت کاری معدن در جدول ۴-۵ آورده شده است. در طول شیفت باربری، قطار در بخش‌های مختلف تونل توقف دارد. مقاومت اعمال شده در نتیجه حضور قطار در هر یک از بخش‌های تونل باربری معدن تخت سبب اعمال مقاومت موضعی در آن شاخه می‌شود. از آنجایی که قطار در ۲ شیفت کامل بیرون از تونل است و تنها در ۱ شیفت در تونل تردد دارد، بنابراین احتمال عدم حضور قطار در تونل $0/66 = (3 \div 2)$ خواهد بود. احتمال مربوط به حضور همزمان قطار در

تونل که در بخش ۴-۵-۲ محاسبه شده است، تنها مربوط به شیفت باربری خواهد بود بنابراین هر یک از حالات تنها مربوط به یک شیفت خواهد بود.

جدول ۴-۶ احتمال حضور قطار در هر یک از شاخه‌های شبکه در طول ۳ شیفت کاری نشان می‌دهد.

جدول ۴-۶- احتمال حضور قطار در هر یک از شاخه‌های شبکه در طول ۳ شیفت کاری

شماره شاخه (محل حضور قطار در تونل)	احتمال حضور قطار در طول ۳ شیفت کاری
عدم قطار در تونل	$(2 \div 3) = 0/66$
۱۱-۱۰	$(1 \div 3) \times (1489 \div 7606) \times 0/337 = 0/22$
۲-۱ ، ۱۱-۱۰	$(1 \div 3) \times 0/3498 = 0/1166$
۳-۲ ، ۱۱-۱۰	$(1 \div 3) \times 0/495 = 0/165$
۹-۱۰	$(1 \div 3) \times (1456 \div 7606) \times 0/34 = 0/217$
۲-۱ ، ۹-۱۰	$(1 \div 3) \times 0/10763 = 0/3578$
۳-۲ ، ۹-۱۰	$(1 \div 3) \times 0/5033 = 0/1677$
۸-۹	$(1 \div 3) \times (23 \div 7606) \times 0/3406 = 0/03433$
۲-۱ ، ۸-۹	$(1 \div 3) \times 0/09433 = 0/03144$
۳-۲ ، ۸-۹	$(1 \div 3) \times 0/05406 = 0/01802$
۷-۸	$(1 \div 3) \times (1506 \div 7606) \times 0/3406 = 0/2248$
۲-۱ ، ۷-۸	$(1 \div 3) \times 0/36233 = 0/1207$
۳-۲ ، ۷-۸	$(1 \div 3) \times 0/5466 = 0/1822$
۲-۱	$(1 \div 3) \times (1486 \div 7606) \times 0/3406 = 0/2218$
۳-۲	$(1 \div 3) \times (1446 \div 7606) \times 0/3406 = 0/2158$

بر اساس کاربری هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه معدن تخت و رده‌بندی تغییرات شدت جریان نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده (بخش ۳-۷)، رده هر یک از شاخه‌ها تعیین شده است. پس از آن محدوده مجاز و بحرانی مربوط به همه شاخه‌ها تعیین شده است. برای مثال، مساحت تونل ۱-۲، ۵ مترمربع می‌باشد و کمترین سرعت مجاز در این بخش از تونل ۲۵٪ متر بر ثانیه است. با توجه به سرعت مجاز و سطح مقطع تونل، شدت جریان مجاز در این شاخه ۱/۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد. این شاخه در رده‌بندی شدت جریان در رده II واقع شده است، بنابراین بازه تغییرات آن تا ۲۰٪ مجاز

خواهد بود. کمترین سرعت بحرانی برای این شاخه ۱ متر بر ثانیه محاسبه شده است. بیشترین شدت جریان مجاز و بحرانی مربوط به تونل ۱-۲ کاملاً با روابط ارائه شده برای کمترین شدت جریان مجاز و بحرانی مشابه است. اطلاعات مربوط به سایر شاخه‌ها نیز در جدول ۴-۸ آورده شده است. تجاوز از مرز بحرانی منجر به از کار افتادگی فاجعه‌آمیز خواهد شد و تجاوز از مرز مجاز منجر به از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک حدود معین خواهد شد (بخش ۳-۸). آزمون چگونگی انطباق بر اساس نرم‌افزار بست فیت^۱ انجام شده است و تمامی مقادیر شدت جریان مربوط به هر شاخه، حداقل از یکی از آزمون‌های انطباق که در بخش ۲-۳-۴ توضیح داده شده است پیروی می‌کند.

خروجی نرم‌افزار بست فیت برای شاخه ۱-۲ از شبکه تهویه تخت در جدول ۴-۷ آورده شده است.

جدول ۴-۷- خروجی نرم‌افزار بست فیت برای شاخه ۱-۲ از شبکه تهویه تخت

Statistics UNTITLED						
Rank/Distribution	Chi-Square		Kolmogorov-Smirnov			
15. Beta	1.0e+34		0.399374			
16. Student's T	1.0e+34		0.15481			
17. Norms	1.0e+34		0.155779			
18. Weibull	1.0e+34		0.155779			
	Student's T	Normal	Weibull	PearsonV	ExtremeValue	PearsonVI
Results:						
Chi-Square						
Test Value	1.0e+34	1.0e+34	1.0e+34	1.0e+34	1.0e+34	1.0e+34
Confidence	Rejected *	Rejected *	Rejected *	Rejected *	Rejected *	Rejected *
Rank	21	15	17	18	20	19
Kolmogorov-Smirnov						
Test Value	0.15481	0.155779	0.155779	0.155779	0.155779	1.0
Confidence	>0.15 *	>0.15 *	>0.15 *	>0.15 *	>0.15 *	Rejected *
Rank	6	13	14	15	16	21
Confidence						
Chi-Square						
Adjusted Value	1.0e+34	1.0e+34	1.0e+34	1.0e+34	1.0e+34	1.0e+34
Critical Value @ .75	5.898826	5.898826	5.898826	5.898826	5.898826	5.898826
Critical Value @ .5	8.342833	8.342833	8.342833	8.342833	8.342833	8.342833
Critical Value @ .25	11.388751	11.388751	11.388751	11.388751	11.388751	11.388751
Critical Value @ .1	14.683657	14.683657	14.683657	14.683657	14.683657	14.683657
Critical Value @ .05	16.918976	16.918976	16.918976	16.918976	16.918976	16.918976
Critical Value @ .025	19.022768	19.022768	19.022768	19.022768	19.022768	19.022768
Critical Value @ .01	21.665994	21.665994	21.665994	21.665994	21.665994	21.665994
Kolmogorov-Smirnov						
Adjusted Value	0.404735	0.424076	0.381579	0.407268	0.361579	2.614397
Critical Value @ .15	1.138	0.774		1.138	0.0	1.138
Critical Value @ .1	1.224	0.019	0.76	1.224	0.76	1.224
Critical Value @ .05	1.358	0.895	0.819	1.358	0.819	1.358
Critical Value @ .025	1.48	0.955	0.00	1.48	0.00	1.48
Critical Value @ .01	1.628	1.035	0.944	1.628	0.944	1.628

با استفاده از ناسازگار بودن احتمال کارآمد و نا کارآمد بودن، و اطلاعات مربوط به جدول ۴-۸ قابلیت اطمینان هر یک از شاخه‌ها در جدول ۴-۹ محاسبه شده است.

¹ Best fit

جدول ۴-۸- تغییرات شدت جریان نسبت به احتمال حضور قطار در هر یک از شاخه‌ها

Q_{15-14} m^3/s	Q_{16-15} m^3/s	Q_{16-17} m^3/s	Q_{4-8} m^3/s	Q_{7-17} m^3/s	Q_{9-16} m^3/s	Q_{10-15} m^3/s	Q_{3-12} m^3/s	Q_{2-13} m^3/s	Q_{10-11} m^3/s	Q_{9-10} m^3/s	Q_{8-9} m^3/s	Q_{7-8} m^3/s	Q_{6-7} m^3/s	Q_{5-6} m^3/s	Q_{4-5} m^3/s	Q_{3-4} m^3/s	Q_{2-3} m^3/s	Q_{1-2} m^3/s	شماره شاخه (محل حضور قطار 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	۲-۱ ، ۱۱-۱۰
۱۳٫۸۴	۹٫۰۱	۴٫۳۷	۴٫۸۱	۴٫۳۷	۴٫۶۴	۴٫۸۳	۲٫۹۹	۲٫۸۲	۲۲٫۷	۱۷٫۹	۱۳٫۲	۸٫۴	۴٫۱	۴٫۱	۴٫۱	۸٫۹	۵٫۹	۳٫۱	۳-۲ ، ۱۱-۱۰
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	۳٫۲	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	۳٫۲	۳-۲ ، ۹-۱۰
۱۵٫۶۶	۱۰٫۰۷	۴٫۶۹	۵٫۲۳	۴٫۶۹	۵٫۳۹	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	۵٫۳۹	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	۵٫۳۹	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

جدول ۴-۹- اطلاعات مربوط به محاسبه قابلیت اطمینان هر یک از شاخه‌ها

شدت جریان شاخص‌های R	Q_{1-2}	Q_{2-3}	Q_{3-4}	Q_{4-5}	Q_{5-6}	Q_{6-7}
رده شدت جریان هر شاخه	رده II	رده II	رده II	رده II	رده II	رده II
میانگین	۳/۴۶	۶/۶۶	۹/۹۲	۴/۵۳	۴/۵۳	۴/۵۳
انحراف معیار	۰/۱۸۷	۰/۳۵	۰/۵	۰/۲۳	۲۳/۰	۰/۲۳
Q_{min} مجاز	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۴/۵	۱/۲۵
Q_{min} بحرانی	۱	۱	۱	۱	۳/۶	۱
Q_{max} مجاز	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۸	۲۰
Q_{max} بحرانی	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۱/۶	۲۴
مقدار استاندارد مجاز Q_{min}	-۱۱/۷۹	-۱۵/۵۲	-۱۷/۷۲	-۱۳/۸۳	-۰/۱۵	-۱۳/۸۳
احتمال تجاوز از مرز مجاز Q_{min}	$۲/۱ \times ۱۰^{-۳۲}$	$۱/۲ \times ۱۰^{-۵۴}$	$۸/۳ \times ۱۰^{-۶۷}$	$۸/۳ \times ۱۰^{-۴۴}$	۰/۴۳	$۸/۳ \times ۱۰^{-۴۴}$
مقدار استاندارد بحرانی Q_{min}	-۱۳/۱۲	-۱۶/۲۳	-۱۷/۷۲	-۱۴/۸۸	-۳/۹۳	-۱۴/۸۸
احتمال تجاوز از مرز بحرانی Q_{min}	$۱/۲ \times ۱۰^{-۳۹}$	$۱/۴ \times ۱۰^{-۵۹}$	$۱/۳ \times ۱۰^{-۷۰}$	$۲/۱۲ \times ۱۰^{-۵۰}$	$۴/۰۸ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۱۲ \times ۱۰^{-۵۰}$
مقدار استاندارد مجاز Q_{max}	۸۸	۳۸/۲	۲۰	۶۵/۰۹	۵۶/۶۷	۶۵/۰۹
احتمال تجاوز از مرز مجاز Q_{max}	۱	۱	۱	۱	۱	۱
مقدار استاندارد بحرانی Q_{max}	۱۰۹/۳۴	۴۹/۶۶	۲۷/۹۳	۸۱/۹۳	۷۱/۸۲	۸۱/۹۳
احتمال تجاوز از مرز بحرانی Q_{max}	۱	۱	۱	۱	۱	۱
Q_f^{All}	$۲/۱ \times ۱۰^{-۳۲}$	$۱/۲ \times ۱۰^{-۵۴}$	$۸/۳ \times ۱۰^{-۶۷}$	$۸/۳ \times ۱۰^{-۴۴}$	۰/۴۴	$۸/۳ \times ۱۰^{-۴۴}$
Q_f^{Cr}	$۱/۲ \times ۱۰^{-۳۹}$	$۱/۴ \times ۱۰^{-۵۹}$	$۱/۴ \times ۱۰^{-۷۰}$	$۲/۱ \times ۱۰^{-۵۰}$	$۴/۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۱ \times ۱۰^{-۵۰}$
حد پایین قابلیت اطمینان	$\cong ۱$	$\cong ۱$	$\cong ۱$	$\cong ۱$	$\cong ۱$	$\cong ۱$
حد بالای قابلیت اطمینان	$\cong ۱$	$\cong ۱$	$\cong ۱$	$\cong ۱$	۰/۵۶	$\cong ۱$

Q_f^{Cr} : احتمال از کار افتادگی فاجعه‌آمیز

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

ادامه جدول ۹-۴

شدت جریان	Q_{7-8}	Q_{8-9}	Q_{9-10}	Q_{10-11}	Q_{12-13}	Q_{13-14}
شاخص های R						
رده شدت جریان هر شاخه	رده II	رده II	رده II	رده II*	رده I	رده I
میانگین	۹/۳۶	۱۴/۷۶	۱۹/۹۱	۲۵/۳۳	۳/۲	۳/۲۶
انحراف معیار	۰/۴۷	۰/۷۴	۰/۹۹	۱/۲	۰/۱۶	۰/۱۵
Q_{min} مجاز	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۴	۱/۴
Q_{min} بحرانی	۱	۱	۱	۱	۱/۱۲	۱/۱۲
Q_{max} مجاز	۲۰	۲۰	۲۰	۴۰	۵/۶	۵/۶
Q_{max} بحرانی	۲۴	۲۴	۲۴	۴۸	۶/۷۲	۶/۷۲
مقدار استاندارد مجاز Q_{min}	-۱۷/۲۲	-۱۵/۵۲	-۱۸/۷۵	-۱۹/۹۴	-۱۱/۱۸	-۱۱/۸۲
احتمال تجاوز از مرز مجاز Q_{min}	$۹/۰ \times ۱۰^{-۶۷}$	$۱/۲ \times ۱۰^{-۵۴}$	$۸/۲ \times ۱۰^{-۷۹}$	$۸/۷۵ \times ۱۰^{-۸۹}$	$۲/۴ \times ۱۰^{-۲۹}$	$۱/۴ \times ۱۰^{-۳۲}$
مقدار استاندارد بحرانی Q_{min}	-۱۷/۵۷	-۱۶/۲۳	-۱۹	-۲۰/۱۴	-۱۲/۹۲	-۱۳/۶۰
احتمال تجاوز از مرز بحرانی Q_{min}	$۸/۱۷ \times ۱۰^{-۷۱}$	$۱/۴ \times ۱۰^{-۵۹}$	$۷/۱ \times ۱۰^{-۸۱}$	$۱/۳۶ \times ۱۰^{-۹۰}$	$۱/۶ \times ۱۰^{-۳۸}$	$۱/۸۴ \times ۱۰^{-۴۲}$
مقدار استاندارد مجاز Q_{max}	۲۲/۵۸	۳۸/۲	۰/۰۸	۱۲/۱۳	۱۴/۸۷	۱۴/۸۶
احتمال تجاوز از مرز مجاز Q_{max}	۱	۱	۰/۵۳	۱	۱	۱
مقدار استاندارد بحرانی Q_{max}	۳۱/۰۷	۴۹/۶۶	۴/۱	۱۸/۷۶	۲۱/۸۲	۲۱/۹۸
احتمال تجاوز از مرز بحرانی Q_{max}	۱	۱	۰/۹۹	۱	۱	۱
Q_f^{All}	$۹/۰ \times ۱۰^{-۶۷}$	$۹/۱ \times ۱۰^{-۱۳}$	۰/۴۶	$۸/۷۵ \times ۱۰^{-۸۹}$	$۲/۳ \times ۱۰^{-۲۹}$	$۱/۴ \times ۱۰^{-۳۲}$
Q_f^{Cr}	$۸/۱ \times ۱۰^{-۷۱}$	$۹/۱ \times ۱۰^{-۱۳}$	۰/۴۶	$۱/۳ \times ۱۰^{-۹۰}$	$۱/۶ \times ۱۰^{-۳۸}$	$۱/۸ \times ۱۰^{-۴۲}$
حد پایین قابلیت اطمینان	$\cong ۱$	$\cong ۱$	۰/۵۳	$\cong ۱$	$\cong ۱$	$\cong ۱$
حد بالای قابلیت اطمینان	$\cong ۱$	$\cong ۱$	۰/۵۳	$\cong ۱$	$\cong ۱$	$\cong ۱$

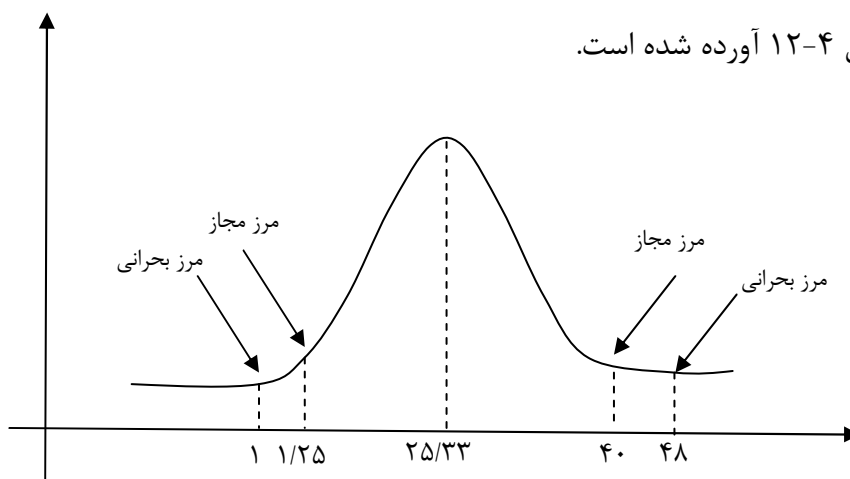
 Q_f^{Cr} : احتمال از کار افتادگی فاجعه آمیز Q_f^{All} : احتمال از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک محدوده معین

ادامه جدول ۹-۴

Q_{15-14}	Q_{16-15}	Q_{16-17}	Q_{4-8}	Q_{7-17}	Q_{9-16}	Q_{10-15}	شدت جریان شاخص های R
رده II	رده II	رده II	رده II	رده I	رده I	رده I	رده شدت جریان هر شاخه
۱۵/۴	۹/۹۸	۴/۸۳	۵/۳۹	۴/۸۳	۵/۱۵	۵/۴۲	میانگین
۰/۷۱	۰/۴۹	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۶	انحراف معیار
۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۴/۵	۱/۴	۱/۴	۱/۴	Q_{min} مجاز
۱	۱	۱	۳/۶	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	Q_{min} بحرانی
۲۰	۲۰	۲۰	۱۸	۵/۶	۵/۶	۵/۶	Q_{max} مجاز
۲۴	۲۴	۲۴	۲۱/۶	۶/۷۲	۶/۷۲	۶/۷۲	Q_{max} بحرانی
-۱۹/۷۲	-۱۷/۵۸	-۱۴/۹۱	-۳/۱۴	-۱۴/۲۹	-۱۴/۴۴	-۱۵/۲۱	مقدار استاندارد Q_{min} مجاز
$6/1 \times 10^{-87}$	$1/6 \times 10^{-69}$	$1/3 \times 10^{-50}$	$8/3 \times 10^{-4}$	$1/2 \times 10^{-46}$	$1/2 \times 10^{-47}$	$1/5 \times 10^{-52}$	احتمال تجاوز از مرز مجاز Q_{min}
-۲۰/۰۷	-۱۸/۰۸	-۱۵/۹۵	-۶/۳۱	-۱۵/۴۵	-۱۵/۵۲	-۱۶/۲۷	مقدار استاندارد Q_{min} بحرانی
$5/8 \times 10^{-90}$	$2/0 \times 10^{-73}$	$1/3 \times 10^{-57}$	$1/3 \times 10^{-10}$	$3/4 \times 10^{-54}$	$1/1 \times 10^{-54}$	$8/0 \times 10^{-60}$	احتمال تجاوز از مرز بحرانی Q_{min}
۶/۳۹	۲۰/۱۴	۶۳/۱۱	۴۴/۴۷	۳/۱۸	۱/۷۱	۰/۶۸	مقدار استاندارد Q_{max} مجاز
۱	۱	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۷۵	احتمال تجاوز از مرز مجاز Q_{max}
۱۱/۹۷	۲۸/۱۹	۷۹/۷۶	۵۷/۱۷	۷/۸۵	۶/۰۲	۴/۹۱	مقدار استاندارد Q_{max} بحرانی
۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۹	احتمال تجاوز از مرز بحرانی Q_{max}
$7/9 \times 10^{-11}$	$1/6 \times 10^{-69}$	$1/3 \times 10^{-50}$	$8/3 \times 10^{-4}$	$7/1 \times 10^{-4}$	۰/۰۴۳	۰/۲۵	Q_f^{All}
$7/9 \times 10^{-11}$	$2/0 \times 10^{-73}$	$1/3 \times 10^{-57}$	$1/3 \times 10^{-10}$	$7/1 \times 10^{-4}$	۰/۰۴۳	۰/۲۴	Q_f^{Cr}
$\cong 1$	$\cong 1$	$\cong 1$	$\cong 1$	$\cong 1$	۰/۹۵	۰/۷۶	حد پایین قابلیت اطمینان
$\cong 1$	$\cong 1$	$\cong 1$	$\cong 1$	$\cong 1$	۰/۹۵	۰/۷۵	حد بالای قابلیت اطمینان

 Q_f^{Cr} : احتمال از کار افتادگی فاجعه آمیز Q_f^{All} : احتمال از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک محدوده معین

برای مثال شاخه ۱۰-۱۱، شاخه ورودی هوا به معدن است. در این شاخه مرز بحرانی و مرز مجاز تغییرات شدت جریان بر اساس رده Π^* یعنی حداقل و حداکثر سرعت هوا تعیین می‌شود. میانگین تغییرات شدت جریان در شاخه مزبور ۲۵/۳۳ مترمکعب بر ثانیه و سطح مقطع مؤثر تونل برای عبور هوا ۵ مترمربع می‌باشد. حداقل شدت جریان مجاز برای شاخه ۱۰-۱۱، بر اساس حداقل سرعت مجاز (جدول ۳-۱)، ۰/۲۵ بوده و از آنجا که تونل مزبور تونل اصلی ورود هوا نیز می‌باشد بر خلاف سایر بخش‌های تونل باربری حداکثر سرعت مجاز ۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین حداقل شدت جریان ۱/۲۵ مترمکعب بر ثانیه و حداکثر شدت جریان مجاز آن ۴۰ مترمکعب بر ثانیه است. از آنجایی که تغییرات شدت جریان بر اساس مشخصات رده Π تا ۲۰٪ مجاز می‌باشد بنابراین مرزهای بحرانی، که تجاوز از آنها سبب از کار افتادگی فاجعه آمیز شاخه شده و باعث از کار افتادگی کل شبکه می‌شود در شکل ۴-۱۲ آورده شده است.



شکل ۴-۱۲- مثال از کار افتادگی فاجعه آمیز و از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک محدوده معین برای شاخه ۱۰-۱۱

از کار افتادگی فاجعه آمیز و حد بالای قابل اطمینان برای شاخه ۱۰-۱۱ برابر با:

$$Q_f^{Cr} = P(Q > 48) + P(Q < 1)$$

$$R_{Max} = 1 - Q_f^{Cr}$$

و احتمال از کار افتادگی از نوع تنزل مشخصات از یک محدوده معین و حد پایین قابلیت اطمینان

$$Q_f^{All} = P(Q > 40) + P(Q < 1/25) \quad \text{برابر با:}$$

$$R_{Min} = 1 - Q_f^{All}$$

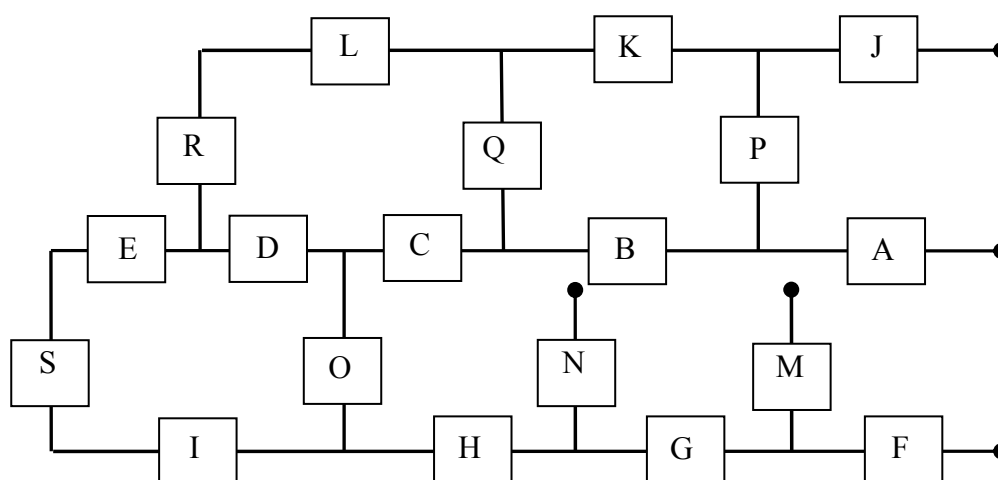
خواهد بود، به طور مشابه این مقادیر برای کلیه شاخه‌های مربوط به شبکه تهویه تخت قابل محاسبه است که نتایج در جدول ۴-۹ آورده شده است.

۴-۵- تحلیل قابلیت اطمینان شبکه تهویه معدن تخت

با استفاده از اطلاعات جدول‌های ۴-۴ و ۴-۵ قابلیت اطمینان شاخه‌های شبکه محاسبه شد. قابل ذکر است که قابلیت اطمینان کل شبکه بر اساس و الگوریتم دیکسترا در حالت از کار افتادگی به صورت تنزل مشخصات از یک محدوده معین محاسبه شده است.

۴-۵-۱- نمودار بلوکی و شناسایی مجموعه‌های انقطاع

قبل از کاربرد شیوه‌های تحلیل شبکه‌ها برای ارزیابی قابلیت اطمینان آنها ضرورتاً باید درک کاملی از روابط میان سیستم‌ها و مدل‌سازی شبکه برای آن حاصل شود. در شکل ۴-۳ شبکه گرافی تهویه معدن زغال‌سنگ تخت ترسیم شده است. برای محاسبه قابلیت اطمینان بر اساس روش ذکر شده ابتدا باید نمودار بلوکی شبکه گرافی ترسیم شود (Rezaei et al., 2009).



شکل ۴-۱۳- نمودار بلوکی مربوط به شبکه تهویه معدن تخت

طبق تعریف مجموع انقطاع عبارت از مجموعه‌ای از عضوهای سیستم است که شکست آنها سبب شکست سیستم می‌شود. یکی از روش‌های شناسایی مجموعه‌های انقطاع که در این تحقیق به کار رفته است بر اساس گام‌های زیر است.

۱. همه مسیرهای غیر تکراری مشخص شود.

در شکل ۴-۱۱ اگر A محل ورود هوا و F، J، M و N خروجی‌ها باشند کلیه مسیرهای غیر تکراری مسیرهایی هستند که هوا از A داخل و از F، J، M و N خارج می‌کنند. مسیرهای غیر تکراری شناسایی شده در زیر آورده شده است.

APJ, ABQKJ, ABCDRLKJ, ABCDESIHGF, ABCOHGF, ABCOHN, ABCDESIHN, ABCOHGM, ABCDESIHGM

۲. آرایه‌های وقوع برای شناسایی عضوهای هر مسیر تشکیل شود.

آرایه‌های وقوع کلیه مسیرهای غیر تکراری شناسایی شده در مرحله قبل را می‌توان در جدولی مانند جدول ۴-۱۰ نمایش داد.

جدول ۴-۱۰- ماتریس مربوط به شناسایی مجموعه‌های انقطاع شبکه تهویه

مسیر	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
<i>APJ</i>	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
<i>ABQKJ</i>	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
<i>ABCDRLKJ</i>	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
<i>ABCDESIHGF</i>	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
<i>ABCOHGF</i>	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
<i>ABCOHN</i>	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰
<i>ABCDESIHN</i>	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱
<i>ABCOHGM</i>	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰

۳. هر گاه همه اجزای ستونی از آرایه وقوع غیر صفر باشد نمایانگر اجزای مجموعه انقطاع رسته اول خواهد بود. تعداد عضوهای هر مجموعه، رسته آن را مشخص می‌کند. در جدول ۴-۱۰ همه اجزای ستونی آرایه A غیر صفر بنابراین آرایه A، آرایه رسته اول مسیرهای انقطاع خواهد بود.

۴. ستون‌های آرایه وقوع دو به دو ملحق می‌شوند.

در صورتی که همه اجزای ستون‌های ملحق شونده غیر صفر باشند، نمایان‌گر عضوهای مجموعه انقطاع رسته دوم خواهد بود. مجموعه انقطاع رسته دومی که در بردارنده مجموعه‌های رسته اول هستند حذف می‌شوند به نحوی که مجموعه انقطاع‌های رسته دوم غیر تکراری حاصل شود. همه اجزای ستون‌های ترکیبی BJ, BP, CJ, HJ غیر صفر هستند و بنابراین این دو ستون ترکیبی، مجموعه‌های انقطاع رسته دوم را مشخص می‌نمایند.

۵. مجموعه انقطاع‌های رسته سومی که دربردارند، مجموعه انقطاع‌های رسته اول و دوم هستند حذف می‌شوند.

بنابراین همه اجزای ستون‌های الحاقی $CKP, CQP, DJO, EJO, GJN, HKP, IJO, JOS$ غیر صفر هستند و مجموع انقطاع رسته سوم را تشکیل می‌دهد.

۶. این روش همچنان ادامه می‌یابد تا بالاترین رسته مجموعه انقطاع به دست آید. همه اجزای ستون‌های ترکیبی زیر غیر صفر هستند و بنابراین مجموع انقطاع رسته چهارم را به دست می‌دهد.

$GKNP, GIJQ, DKOP, EKOP, HLPQ, DOPQ, DHPQ, KPOS, HPQR, FJMN, IKOP$

۷. با آزمایش رسته‌های بالاتر ملاحظه خواهد شد به جز مجموعه‌های زیر هیچ یک از اعضا غیر تکراری نبوده و بنابراین کوچکترین مجموعه‌ها، مجموعه‌های انقطاع با کمترین اعضا شامل اجزای زیر خواهد بود.

$ELOPQ, EOPQR, GLNPQ, ILOPQ, IOPQR, LOPQS, OPQRS$

با استفاده از روش توضیح داده شده همه مسیرهای انقطاع مربوط به نمودار بلوکی ۴-۱۱ در جدول ۴-۱۱ آورده شده است. به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه تپهویه، مجموعه‌های کمترین عضوهایی که حالت‌های شکست سیستم را به وجود می‌آورند باید کاملاً کارآمد بوده بنابراین در مرحله اول قبل از محاسبه قابلیت اطمینان کل شبکه، قابلیت اطمینان پایانه محاسبه می‌شود. در صورتی که پایانه قطع نبود قابلیت اطمینان کل شبکه محاسبه خواهد شد.

جدول ۱۱-۴- مسیرهای انقطاع مربوط به نمودار بلوکی ۱۱-۴

شماره مسیر	مسیر انقطاع	قابلیت اطمینان پایانه
C_1	A	$\cong 1$
C_2	BJ	$\cong 1$
C_3	BP	$\cong 1$
C_4	CJ	$\cong 1$
C_5	HJ	$\cong 1$
C_6	CKP	$\cong 1$
C_7	CQP	$\cong 1$
C_8	DJO	$\cong 1$
C_9	EJO	$\cong 1$
C_{10}	GJN	$\cong 1$
C_{11}	HKP	$\cong 1$
C_{12}	JOS	$\cong 1$
C_{13}	$GKNP$	$\cong 1$
C_{14}	$GIJQ$	$\cong 1$
C_{15}	$DKOP$	$\cong 1$
C_{16}	$EKOP$	$\cong 1$

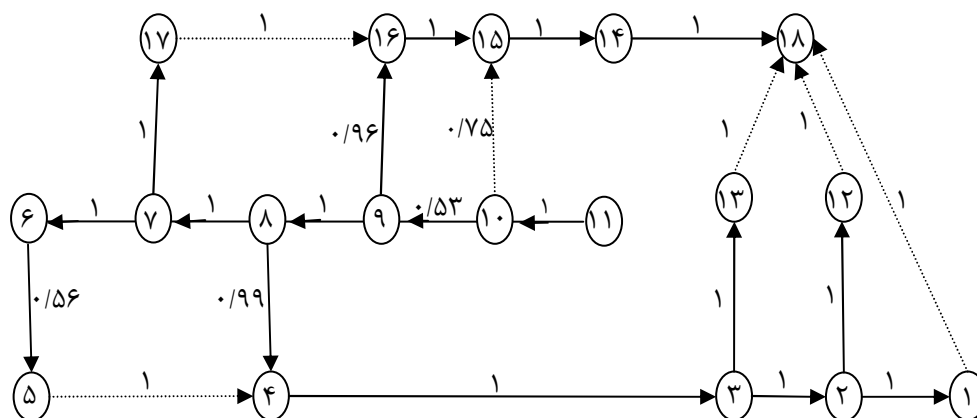
شماره مسیر	مسیر انقطاع	قابلیت اطمینان پایانه
C_{17}	$HLPQ$	$\cong 1$
C_{18}	$DOPQ$	$\cong 1$
C_{19}	$DHPQ$	$\cong 1$
C_{20}	$KPOS$	$\cong 1$
C_{21}	$HPQR$	$\cong 1$
C_{22}	$FJMN$	$\cong 1$
C_{23}	IJO	$\cong 1$
C_{24}	$ELOPQ$	$\cong 1$
C_{25}	$EOPQR$	$\cong 1$
C_{26}	$GLNPQ$	$\cong 1$
C_{27}	$ILOPQ$	$\cong 1$
C_{28}	$IKOP$	$\cong 1$
C_{29}	$IOPQR$	$\cong 1$
C_{30}	$LOPQS$	$\cong 1$
C_{31}	$OPQRS$	$\cong 1$

۴-۵-۲- محاسبه قابلیت اطمینان شبکه تهویه تخت با الگوریتم دیکسترا

همان گونه که بیان شد الگوریتم دیکسترا برای حل مسائل بهینه سازی و یافتن سریع ترین مسیر در یک گراف از یک رأس به سایر رؤوس ارائه شده است. این الگوریتم با بهره مندی از منطق ریاضی تضمین می کند که جستجوی سریع ترین مسیر بر روی گراف، منجر به ارائه جواب بهینه شود (کرمن و همکاران ۱۳۸۵).

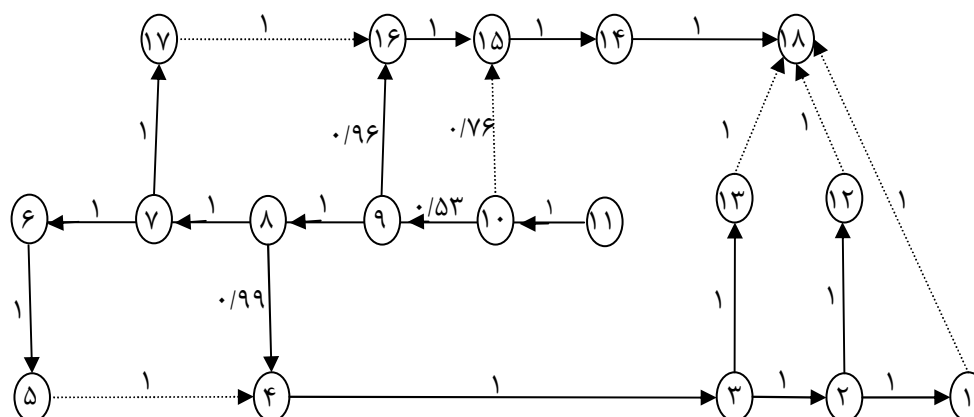
برای اجرای این الگوریتم ابتدا گرافی وزن دار از شبکه تهویه تهیه می شود که وزن هر یک از شاخه ها قابلیت اطمینان مربوط به آن شاخه است. اجرای الگوریتم دیکسترا برای شناسایی کوتاهترین مسیر از حاصل ضرب قابلیت اطمینان هر یک از شاخه ها بدست آورده شده است.

بنابراین در شکل ۴-۱۳ نتیجه اجرای الگوریتم دیکسترا بر روی گراف شکل ۴-۳، با انتخاب گره شماره ۱۱ به عنوان گره آغازین و گره ۱۸ به عنوان گره پایانی نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مسیرهای بهینه بین این گره و هر یک از گره های دیگر به همراه قابلیت اطمینان متناظر با آن مسیرها قابل استخراج است. از آنجایی که برای هر یک از شاخه های شبکه تهویه تخت یک حد بالا و یک حد پایین از قابلیت اطمینان معرفی شده است. بنابراین حد بالای قابلیت اطمینان شبکه تهویه، از اجرای الگوریتم دیکسترا بر گراف وزن دار با حد بالای قابلیت اطمینان (شکل ۴-۱۴) بدست خواهد آمد.



شکل ۴-۱۴- نتیجه اجرای الگوریتم دیکسترا بر روی گراف وزن دار با حد بالای قابلیت اطمینان معدن تخت

قابلیت اطمینان (شکل ۴-۱۵) محاسبه شده است.



شکل ۴-۱۵- نتیجه اجرای الگوریتم دیکسترا بر روی گراف وزن دار با حد پایین قابلیت اطمینان معدن تخت

بنابراین حد پایین قابلیت اطمینان شبکه تهویه بین گره ورودی و خروجی برابر با برابر با ۰/۳۰ (شامل گره‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱) خواهد بود و نیز حد بالای قابلیت اطمینان شبکه تهویه بین گره ورودی و خروجی برابر با برابر با ۰/۵۳ (شامل گره‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱) خواهد بود.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہدات

۵-۱- نتیجه گیری

گاز زغال و گرد و غبار به هر صورت و در هر مکانی می تواند عامل زیان آوری به حساب آید. حضور این عوامل علاوه بر آن که ممکن است باعث انفجار معدن شود، میدان دید را کاهش داده، سبب ناراحتی هایی از جمله حساسیت زیاد شده و خسارت های عمده به ماشین آلات و یا تجهیزات مکانیکی وارد می آورد بنابراین حفظ عملکرد شبکه تهویه معدن در یک سطح مطلوب ضروری است. شبکه تهویه در معادن زیرزمینی ممکن است تحت تأثیر عواملی نظیر قرار گرفتن اجسام در مسیر عبور هوا، کاهش سطح مقطع کارهای معدنی و خرابی سیستم های نگهداری دچار افت فشار و ناپایداری جریان هوا شود.

ملاحظات اقتصادی و ایمنی در یک معدن زیرزمینی ایجاب می کند که شبکه تهویه آن به نحوی مؤثر، ایمن و قابل اطمینان بتواند میزان هوای مورد نیاز در نقاط مختلف شبکه را تأمین کند. قابلیت اطمینان به عنوان یک مشخصه مهندسی عمومی برای ارزیابی اطمینان از عملکرد سیستم های مختلف مهندسی در گرایش های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در یک سیستم تهویه ابتدایی ترین وظیفه هر شاخه انتقال هوا است. بنابراین برای محاسبه قابلیت اطمینان مربوط به هر شاخه معیار عملکرد رضایت بخش مناسب معرفی شده است و رده بندی هایی بر اساس معیارهای عملکرد رضایت بخش ارائه شده است که با استفاده از رده بندی های ارائه شده قابلیت اطمینان شاخه ها محاسبه می شود.

به دلیل لزوم عملکرد صحیح هر یک از اجزای شبکه تهویه، روش‌های ارائه شده برای محاسبه قابلیت اطمینان در سایر شاخه‌های مهندسی در تحلیل قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه کاملاً کاربرد نخواهد داشت. بنابراین برای محاسبه قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه از روشی ابتکاری با استفاده از الگوریتم دیکسترا استفاده شده است. در این روش از الگوریتم دیکسترا برای شناسایی مسیرهای کمینه استفاده شده است.

قابلیت اطمینان هر یک از شاخه‌ها به صورت جداگانه محاسبه و قابلیت اطمینان هر یک از شاخه‌ها را با توجه به احتمال حضور قطار ارزیابی و در تحلیل وارد شده است.

زمان به کارگیری روش ارائه شده در مقایسه با روش‌های شبیه‌سازی برای شبکه‌های مشابه، بسیار کمتر است از این‌رو در شبکه‌های بزرگ صرفه‌جویی در زمان و هزینه از مهمترین مزایای آن به شمار می‌آید. روش یاد شده منحصر به شبکه‌های تهویه نیست و می‌توان از آن در هر شبکه آسیب‌پذیر یا احتمالاتی که ظرفیت کاربری آن اهمیت داشته باشد (مانند شبکه‌های حمل و نقل، شبکه‌های الکترونیکی، شبکه‌های آبرسانی و ...)، بهره برد.

با روش ابتکاری ارائه شده حد پایین قابلیت اطمینان شبکه تهویه تخت برابر با $0/30$ و نیز حد بالای قابلیت اطمینان برابر با $0/53$ خواهد بود.

۵-۲- پیشنهادات

- موانع موجود در مسیر عبور هوا در شبکه‌های تهویه، تنها حضور قطار نیست. عواملی چون ریزش‌ها، تغییرات سطح مقطع، آتشباری و غیره در تحلیل قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه مؤثر است بنابراین پیشنهاد می‌شود تأثیر عوامل مذکور در مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه مورد بررسی واقع شود.

- در این پایان نامه قابلیت اطمینان شبکه‌های تهویه به صورت کمی معرفی شده است. پیشنهاد می‌شود با کمی کردن قابلیت اطمینان مربوط به همه پارامترها، تحلیل ریسک و آنالیز حساسیت انجام شود.
- ایجاد فضاهای بارگیری برای واگن‌های انتقال مواد در فضای خارج از مسیر عبور هوا به منظور کاهش افت ناشی از حضور قطار
- استفاده از لکوموتیو و واگن‌های با کمترین میزان ضریب مقاومت آیرودینامیک
- افزایش سرعت تردد لکوموتیوها در تونل به منظور کاهش زمان حضور قطار در مسیر عبور هوا
- استفاده از یک فن کمکی و یا ارتقاء فن مورد استفاده در شبکه به منظور جبران افت فشار ناشی از حضور لکوموتیو در بحرانی‌ترین شرایط

منابع فارسی

- بینینتون، ر. و آلن، ر. (۱۳۷۹)، ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی مفاهیم و روش‌ها (ترجمه رضائیان، م)، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ص ۲۲۵-۱۰۷
- دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی. (۱۳۷۱)، طرح اکتشافات و تجهیز معدن زغال سنگ تخت، ۲۵ صفحه.
- 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، ۱۲ ص
- زاد یوسفی، ی. (۱۳۵۹)، ایمنی در معادن زیرزمینی و تونل سازی، مؤسسه کار و امور اجتماعی.
- شانن، ر. (۱۳۷۱)، علم بهینه‌سازی سیستم‌ها (ترجمه علی اکبر مازار، جلد اول، مرکز نشر دانشگاهی تهران، ۴۵۰ صفحه.
- فروند، ج. و والپول، ر. (۱۳۷۱)، آمار ریاضی (ترجمه عمیدی، ع. وحیدی اصل، م)، مرکز نشر دانشگاهی، ص ۲۷۱-۲۱۱

- کراری، م. (۱۳۸۲)، دینامیک و کنترل سیستم‌های قدرت، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۶۰۴ صفحه.
- کرمن، ت. لیزرسان، چ. رایوست، ر. استاین، ک. (۱۳۸۵)، مقدمه‌ای بر الگوریتم‌ها (ترجمه گروه مهندسی پژوهشی خوارزمی)، نشر درخشش، ۷۲۵ صفحه.
- مدنی، ح. (۱۳۶۶)، تهویه در معادن، جلد یک، انتشارات امیرکبیر، ص ۱۶۰-۱۵۰
- مدنی، ح و همکاران. (۱۳۷۳)، بازرسی در معدن، مؤسسه آموزشی و پژوهشی وزارت معادن و فلزات.
- مه‌آبادی ا.ا. (۱۳۷۸)، شبیه سازی، انتشارات آذرخش، تهران، چاپ اول، ۵۸۶ صفحه.

Reference

- Allan, R.N., Billinton, R., De Oliveira, M.F., 1976. *An efficient algorithm for deducing the minimal cyst and reliability indices of a general network configuration*, IEEE Trance, On reliability, pp. 226- 233.
- Barabady, J., Kumar, U., 2008. *Reliability analysis of mining equipment: Acace study of crushing plant at Jajarm Bauxite mine in Iran*, Reliability Engineering and system safty, pp. 647-653.
- Billinton, R., Allan, R.N., 1992. *Reliability Evaluation Of Engineering Systems*. New York, pp. 23-13.
- Birolini, A., 2002. *Reliability Engineering, Theory and Practice*, Vol.1, Destech publication, usa, pp. 721.
- Chatifield, C., 1983. *Statistics for Thechnology*, Chapan and Hall, pp. 377.
- Conner, P., 2003. *Practical Reliability Engineering*, pp. 11-13.
- Dekking, F.M., Kraaikamp, C., Lopuka, H.P., Meester, L.E., 2005. *A Modern Introduction to Probability and Statistics, Understanding Why and How*, Springer, pp. 484.
- Dey, A., Bhattacharya, J., Banerjee, S., 1994. *Prediction of field reliability for dumper tiers*, Int, J. surf. Min. Reclament. Environ, pp. 23-25.

- Dhillon, B.S., 2008. *Mining Equipment Reliability, Maintainability ,and Safety*, Springer, pp. 209.
- Dijkstra, E.W., 1959. *A note on two problems in connexion with graphs*, Numerische Mathematik 1, pp. 269–271.
- Dongpeng, y., Iinlin, L., Lun, R., 2008. *Reserch on Reliability of complex coal mine ventilation Nwetwork*, IEEE Transactions on reliability.
- Gendenk, B., Ushakov, I., 1995. *Probabilistic Reliability, Maintainability and Safety*,Springer, pp. 209.
- Goodman, G.V.K., 1988. *An assessment of coal mine escape way reliability using fault tree analysis*, Mining science and technology, pp. 205-215.
- Hall, G.J., 1981. *Mine ventilation engineering*, Society for mining metallurgy, pp. 344
- Hall, R., Daneshmend, L. K., 2003. *Reliability Modeling of Surface Mining Equipment: Data Gathering and Analysis Methoologies*, , Int, J. surf. Min. Reclament. Environ. Pp 139- 155.
- Hall, R., Daneshmend, L. K., 2003. *Reliability and maintain ability models for mobile underground hawlage equipment*, CIM Bulletin, pp 159-165.
- Hartman, H.L., Britton, S.G., Mutmansky, J.M., Gentry, D.W., Josph Schlitt, W., Karmis, M., Singh, M.M., 1992. *SME Mining Engineering Handbook*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, pp. 1052- 1106
- Hoyland, A., Rausand, M., 2004. *System Reliability Theory; Models, Statistical Methods and Applications*, 2nd Edition, Wiely & Sons, pp. 644.
- Iida, Y., Wakabayashi, H. 1989. *Anapproximation method of terminal reliability of road network using partial minimal path and cut set*, Proceedings of the Fifth WCTR, vol. IV, Yokohama, PP. 367-380.
- Jalali, S.E., Sereshki, F., Rezaei, Z., 2009. *The reliability of ventilation network*, Ninth Internation Mine Ventilation Congress, pp. 651- 663.
- Kumar, U., Granholm. S., 1988. *Reliability Techniqe: a powerful tool for mine oprator*, Mineral Ressource Engineering. Vol. 1, pp. 13- 28
- Kumral, m. 2005. *Reliability – based optimization of a mine production system using genetic algorithms*, Journal of loss prevention in the process Industries, pp. 186- 189.

- Kutz, M., 2003. *Handbook of transportation engineering*, New York: McGraw-Hill
- Mandel, S.K., Banik, D.K., 1996. *Evaluation of Reliability Index of Long wall Equipment Systems*, Mining Technology, pp. 137-140.
- Modarres, M., Kaminskiy, M., Kirtsov, V., 1999. *Reliability engineering and risk analysis*, New York Marcel Dekker, pp. 16-388.
- Mukhopadhyay, A. K., 1988. *Open pit system reliability*, Mines Metals Fules, pp. 389-392.
- Rasmunson, D.M., Marshall, N.H., FATRAM., 1978. *A core efficient cut set algorithm*, IEEE Trance, On reliability, pp. 250- 253.
- Rezaei, Z., Jalali, S.E., Sereshki, F., 2009. *Modeling of reliability of ventilation network*, Intrnational Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, pp. 544-537.
- Samanta, B., Sarkar, B., Mukherjee, S.K., (2001). *Reliability centered maintenance (RCM) for heavy earth – moving machinery in an open cast coal mine*, GIM Bull, pp 104- 108.
- Singh, C., Billinton, R., 1973. *A new mrthod to determine the failure frequency of complex system*, Microelectronics and reliability, pp. 459- 465.
- Skochinsky, A., Komarov, V., 1969. *Mine ventilation*, Mir Publisher, Moscow, pp.580.
- Stank, E.K., Venkata, S.S., 1988. *Mine power system reliability*, IEEE, Transactions on Industry Application. Vol. 24. No. 5.
- Vesley, W.E., Coldberg, F.F., Roberts, N.H., Hassal, D.F., *Fault Tree Handbook*, Report No . NUREG-0492.
- Wang, H., Pham, H., 2006. *Reliability and Optimal Maintenance*, Springer. Pp. 352.

ABSTRACT

Analysis of the reliability of ventilation mine network

Ventilation networks in underground mines may be affected by items such as: locating of objects in air path or destruction of support systems which would result in pressure loss and distortion of air flow. By considering the necessity of keeping the network performances at appropriate level in such conditions, in this study, definition of ventilation network evaluation has been proposed which indicates the network reliability in an uncertain situation. Economic and safety concerns in mines involve this fact that the ventilation network should provide the amount of air in an effective, reliable and safe manner. For designing or evaluating a ventilation network to obtain the devised purposes, designers need criterions and regulations which through them a network with proper performance is achieved. So far, there is no determined approach to analyze the efficiency of network. It seems that calculation of network components reliability and then, at last, estimation of network reliability is the best measure in order to achieve this aim. In this study has been recommended a new method based on Dijkstra algorithm for analysis of the reliability of ventilation network. Whit using of the air flow distribution function that has been created due to train moving in haulage tunnel is defined reliability of each branch network.

Keywords: under ground mining, ventilation, reliability, branch, network.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics

Analysis of Reliability in Ventilation Network
Case study: Takht Mine

By
Zohre Rezaei

Under supervision
of
Dr. Seyed Mohammad Esmail Jalali
Dr. Farhang Sereshki

A thesis submitted to graduate studies office
in partial fulfillment of requirement for the degree of
Master of Engineering
in
Mining Engineering

July 2010