

تحلیل حساسیت شبکه‌های تهویه با روش‌های مبتنی بر مشتق

زهره رضایی^۱، مجید عطایی‌پور^{۲*}، سید حسن مدنی^۳

۱. دانشجوی دکتری استخراج مهندسی معدن، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، zrezaei@aut.ac.ir

۲. نویسنده مسوول مکاتبات، دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، map60@aut.ac.ir

۳. استادیار دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران. hmadani@aut.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵)

چکیده

شبکه‌های تهویه در معادن زیرزمینی در طول عملیات استخراج ممکن است، تحت تاثیر پارامترهایی داخلی و خارجی قرار گیرد و در نتیجه کارایی پیش‌بینی شده در مرحله طراحی را نداشته باشد. معرفی پارامترهای دخیل در کارایی شبکه تهویه یکی از مهمترین مراحل ارزیابی شبکه تهویه است. در این تحقیق تغییرات مقاومت یکی از پارامترهای دخیل در کارایی شبکه تهویه تعریف شده است. اثر عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی تغییرات مقاومت ناشی از عوامل داخلی و خارجی در شبکه تهویه با استفاده از آنالیز حساسیت کمی‌سازی شده است. برای این هدف شیب تفاضل محدود تغییرات شدت جریان پس از هر بار تغییر مقاومت، نسبت به شدت جریان در حالت عادی به عنوان کمیت حساسیت اندازه‌گیری شده است. روش ارائه شده برای شبکه تهویه معدن تحت اجرا شد. نخست تغییرات مقاومت در تونل اصلی که وظیفه حمل و نقل پرسنل و مواد حاصل از استخراج را به عهده دارند، به عنوان ورودی مدل تحلیل حساسیت در نظر قرار گرفت. بر اساس رابطه افت فشار، تغییرات شدت جریان همه شاخه‌ها به ازای هر بار تغییر به عنوان خروجی مدل ذخیره شد و شیب تفاضل محدود تغییرات شدت جریان پس از هر بار اعمال تغییر مقاومت به عنوان مقدار حساسیت هر شاخه محاسبه شد. بیشترین مقدار، معرف حساس‌ترین شاخه نسبت به تغییر مقاومت در تونل اصلی است. حساس‌ترین شاخه، تونل خروج هوا از بخش‌های مختلف معدن و دوپل تهویه انتقال هوا بین دو تراز ارتفاعی متفاوت است. شاخه‌های با حساسیت بالا ریسک بالاتری برای بروز مشکلات در سیستم تهویه دارند، بنابراین می‌توان حساسیت هر شاخه از شبکه را به عنوان ضریبی در مدل تحلیل قابل اعتماد بودن لحاظ کرد.

کلمات کلیدی

معدن تخت، شبکه تهویه، مقاومت، افت فشار.

* نویسنده مسوول مکاتبات.

۱- مقدمه

تعبیر شده است. تغییر مقاومت در یک شاخه شدت جریان کل شبکه تهویه را متأثر می‌کند. برخی از شاخه‌ها حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات مقاومت از خود نشان می‌دهند، بازه تغییرات شدت جریان در شاخه‌های حساس‌تر گسترده‌تر است. بنابراین شناسایی شاخه‌های حساس در شبکه‌های تهویه دارای اهمیت است. در این تحقیق با استفاده از روش‌های مبتنی بر مشتقات جزئی حساسیت شدت جریان در شاخه‌های مختلف شبکه تهویه معدن تخت نسبت به تغییرات مقاومت در تونل اصلی که وظیفه حمل و نقل مواد معدنی و انتقال پرسنل را به عهده دارد، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

پدیده‌های پیچیده مهندسی، فیزیکی، زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی با استفاده از تقریب‌های ریاضی مدل می‌شوند. یک مدل ریاضی شامل پارامترهایی با ارتباط منطقی با یکدیگر است، تعیین پارامترهایی که بیشترین تأثیر را در نتایج مدل دارد یکی از ابزار توسعه مدل است. آنالیز حساسیت یکی از این ابزارها است که علاوه بر اعتبارسنجی مدل ریاضی، راهنمایی در زمینه گسترش مدل ارائه می‌کند. به عبارت دیگر ضریب حساسیت، آهنگ تغییرات خروجی نسبت به تغییرات متغیرهای ورودی است، به صورتی که سایر پارامترها ثابت باقی مانده باشند [۱۲].

با توجه به نوع و کاربرد مدل ریاضی آنالیز حساسیت به ۶ گروه روش‌های مبتنی بر مشتقات جزئی، اغتشاش، تجزیه و تحلیل همبستگی و رگرسیون، واریانس، تراکم و آنالیز حساسیت منطقه‌ای (روش مونت کارلو) تقسیم می‌شود [۱۳]. استفاده از روش‌های مختلف آنالیز حساسیت برای یک مدل، ممکن است نتایج متفاوتی را تولید کند [۱۴].

ساده‌ترین نوع آنالیز حساسیت، تغییر در فاکتورهای ورودی است. در این روش با تغییر جزئی مقدار ورودی در یک زمان ثابت (با ثابت بودن سایر متغیرها) تغییرات خروجی محاسبه می‌شود. اگر تابع هدف به صورت رابطه ۱ معرفی شده باشد:

$$y = g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_M) \quad (1)$$

و y یک مقدار خروجی اسکالر باشد، عمومی‌ترین روش برای اندازه‌گیری آنالیز حساسیت خروجی نسبت به متغیر ورودی i ام با استفاده از روش مشتقات جزئی $\left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)$ به صورت محاسبه شیب تفاضل محدود دست می‌آید (رابطه ۲):

[۱۵]

پیشرفت تکنولوژی امکان استخراج از اعماق زیاد را فراهم کرده است. استخراج در معادن زیرزمینی وابسته به تهویه بهره‌بردار چالش مهمی برای طراحان پیش از استخراج است. طراحان از مدل‌های ریاضی تحلیل شبکه تهویه که به صورت منطقی با یکدیگر مرتبطند برای برنامه‌ریزی بهره‌بردار استفاده می‌کنند. به وجود آوردن شرایط مختلف در پارامترهای دخیل در طراحی شبکه تهویه می‌تواند به اعتبارسنجی طرح بهره‌بردار ارایه شده کمک کند. یکی از روش‌های ایجاد شرایط مختلف روش‌های شبیه‌سازی است. در روش‌های مبتنی بر مشابه‌سازی، رفتار واقعی سیستم تهویه را از شبیه‌سازی فرآیندهای دخیل در پارامترهای طراحی بررسی می‌کند [۱، ۲]. ارتباط بین تغییرات پارامترهای گوناگون بر اساس خواص حاکم بر سیالات و نیز از طریق روش‌های عددی برای طراحی سیستم‌های تهویه معدن قابل محاسبه است [۳-۶]. گسترش و ادامه فضای استخراج شرایط جدیدی را بر شبکه تهویه تحمیل می‌کند. تحلیل حساسیت مدل ریاضی شبکه تهویه، عدم قطعیت موجود در شرایط جدید معدن را تحلیل می‌کند. تحلیل حساسیت به طور گسترده در امکان‌سنجی اقتصادی احداث معدن، بستن و گسترش فضای استخراج مورد استفاده قرار گرفته است [۷-۹]. هزینه اعمال شده بر معدن در نتیجه شدت جریان‌های غیر عادی با استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل حساسیت توسط وانگ (۲۰۱۴) مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰] در تحقیقی که توسط لی و همکاران (۲۰۱۱) انجام شده است، سرعت پره‌های بادبزن به عنوان پارامتر ورودی مدل تحلیل حساسیت شدت جریان شبکه تهویه در نظر گرفته شده است [۱۱].

ابتدایی‌ترین وظیفه شبکه‌های تهویه در معدن، وارد کردن هوای سالم و خارج کردن هوای آلوده از بخش‌های مختلف معدن است به گونه‌ای که شرایط مساعد برای کار پرسنل و تجهیزات استخراج فراهم شود. بنابراین کاهش کیفیت و کمیت هوای ورودی، منتقل شده به بخش‌های مختلف و خروجی نسبت به یک محدوده معین باعث خواهد شد که شبکه تهویه کارایی پیش‌بینی شده را نداشته باشد. مقاومت یکی از عوامل تغییرات شدت جریان در شبکه‌های تهویه است. گسترده شدن شبکه‌های تهویه در حین استخراج، مقاومت‌هایی بر شبکه اعمال می‌کند که در این تحقیق به مقاومت ناشی از موانع

اند. 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.

$$S_i(x) = \frac{g(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_M) - g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_M)}{\Delta x_i} \quad (2)$$

۳- مدلسازی شبکه تهویه

جدول ۱ - مشخصات و نام هر یک از لایه‌های معدن تخت.

نام لایه	ضخامت (متر)	شیب لایه (درجه)	ذخیره (میلیون تن)
K ₈	۱٫۵ تا ۰٫۵۲	۲۵ تا ۳۰	۶
K ₁₀	۲٫۳۸ تا ۰٫۹	۲۵ تا ۳۰	۹
K ₁₁	۱٫۴۳ تا ۰٫۸۲	۱۷ تا ۳۵	۱۰
K ₁₇	۱٫۰۷ تا ۰٫۷۹	۲۵ تا ۳۵	۶
K ₁₉	۲٫۲۹ تا ۰٫۹	۲۷ تا ۳۵	۹
K ₂₀	۰٫۶۱ تا ۰٫۴۸	۲۶ تا ۳۲	۴

سیستم تهویه مجموعه‌ای از اعضا است که به صورت متوالی، موازی و یا ترکیبی و پیچیده با یکدیگر مرتبط‌اند. قبل از تحلیل حساسیت شبکه‌های تهویه باید درک کاملی از روابط میان سیستم و مدلسازی شبکه برای تحلیل‌گر شود. تونل‌ها و سایر حفاریات معدنی در یک شبکه تهویه، شاخه‌هایی‌اند که در نقاط گره به یکدیگر متصل شده‌اند. برای مدلسازی شبکه تهویه و تحلیل حساسیت، نخست مدل گراف معدن تهیه و پس از مدلسازی، تحلیل حساسیت مربوط به آن انجام می‌گیرد. برای دستیابی به طرح گراف معدن فرض‌های زیر در نظر گرفته شد:

سیستم نگهداری در کارگاه‌های استخراج، نگهداری چوبی و در تونل‌های اصلی سیستم فولادی از نوع قاب است. همچنین استخراج در کارگاه‌های معدن با پیکور انجام می‌شود [۱۶]. نمای افقی کل شبکه معدن زغال‌سنگ تخت در شکل ۱- الف نشان داده شده است.

- پهنه‌های استخراج شده، تخریب یا پر شده نیازی به هوارسانی ندارند، بنابراین از شبکه گراف معدن حذف می‌شوند.
- محل برخورد هر یک از حفاریات معدنی به یکدیگر برای مثال محل برخورد تونل‌های دنباله‌رو به دوپیل‌های تهویه یک گره محسوب می‌شوند.
- ارتباط دو گره مجاور با یک شاخه نشان داده می‌شود که معرف یک حفاریه خاص مانند کارگاه استخراج، دوپیل تهویه و نظایر آن است.
- اغلب گراف‌ها کمیت‌های برداری و دارای جهت و بزرگی (وزن)‌اند. جهت جریان هوا در هر شاخه جهت گراف و شدت جریان و مقاومت هر شاخه به طور جداگانه بزرگی هر پیل گراف معدنی است.

کوچک بودن مقیاس نقشه، نمایش جزئیات شبکه معدنی را مقدور نمی‌کند. بنابراین جزئیات نقشه تنها برای بخش کوچکی از معدن در شکل ۱- ب نشان داده شده است.

۳-۱- مدلسازی شبکه تهویه معدن تخت

شبکه معدن تخت با استفاده از نقشه نمای افقی معدن (شکل ۱) و چهار ویژگی اصلی شبکه معدنی که در بخش مدلسازی به آن اشاره شد، تهیه شده است (شکل ۲).

۳-۲- محاسبه شبکه تهویه

با هدف ارایه طرح تهویه، پس از محاسبه افت در شبکه، شدت جریان هر شاخه و به دنبال آن شدت جریان کل محاسبه شد. بادبزن تولیدکننده فشار و شدت جریان لازم به شبکه معرفی شد. از آنجا که هدف این تحقیق تحلیل حساسیت شبکه تهویه بود، روش طراحی شبکه تهویه مختصر ارائه شده است.

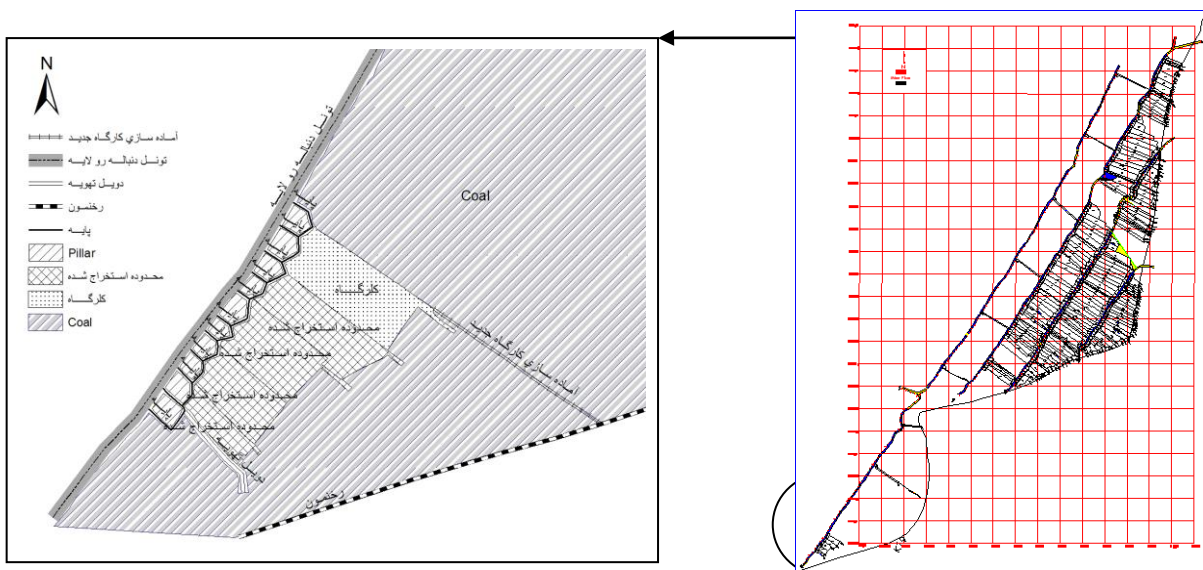
منطقه تخت در ۱۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مینو دشت واقع شده است. بر اساس گزارش دفتر فنی اکتشافات شرکت البرز شرقی (۱۳۷۱) مشخصات و نام هر یک از لایه‌های این معدن به صورت جدول ۱ ارایه شده است.

۳-۲-۱- محاسبه مقاومت

یکی از دو مولفه غیربررداری (بزرگی) شبکه معدنی مقاومت است. مقاومت هر یک از شاخه‌ها مرکب از سه مولفه زیر 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 و ۴ نام‌گذاری شده

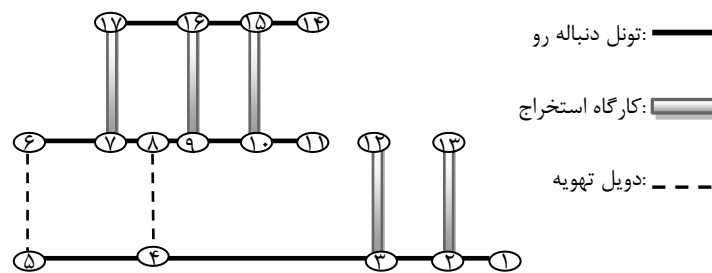
- مقاومت ناشی از اصطکاک
- مقاومت ناشی از وجود موانع در مسیر جریان هوا
- مقاومت موضعی (محلی)



الف - نمای افقی کل شبکه معدن زغال‌سنگ تخت

ب - نمای افقی جزئی بخشی از شبکه معدن زغال‌سنگ تخت

شکل ۱- نمای افقی شبکه معدن تخت [۱۶].



شکل ۲- شبکه معدن تخت.

$$R = \alpha \frac{LP}{S^3} \quad (3)$$

که در آن:

α ضرایب اصطکاک مربوط به بخش‌های مختلف

L طول حفریه معدنی

P محیط حفریه معدنی

S مساحت حفریه معدنی

ضرایب α مربوط به بخش‌های مختلف معدن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ضرایب اصطکاک مربوط به بخش‌های مختلف معدن تخت [۱۶].

مشخصات کار معدنی	α (سیستم متریک)
تونل‌های دنباله‌رو زغال	۰/۰۰۱۹
تونل‌های عبور هوا حفر شده در زغال	۰/۰۰۰۳
کارگاه‌های استخراج	۰/۰۰۴۵

مقاومت اصطکاکی به ویژگی‌های هندسی حفریات بستگی دارد و مقاومت ناشی از وجود موانع در مسیر جریان هوا به دلیل وجود موانع احتمالی در مسیر جریان هوا حاصل می‌شود. این موانع ممکن است، واگن‌های ویژه حمل مواد معدنی یا افراد، مواد حاصل از خرابی تونل، تردد افراد در تونل و نظایر آن باشد. مقداری از انرژی مفید هوا، صرف از بین بردن مقاومت مانع مزبور می‌شود و این امر، در جریان هوا اغتشاش به وجود می‌آورد. علاوه بر مقاومت‌های یاد شده هوا به هنگام عبور از بخش‌های مختلف معدن با ویژگی‌های هندسی متفاوت دچار افت فشار می‌شود و مقداری از انرژی خودش را از دست می‌دهد. از جمله این موانع پیچ و خم‌ها، انشعاب‌ها، درهای تهویه و محل‌های گشاد شدن و یا تنگ شدن حفریات معدنی را می‌توان نام برد. مقاومت ناشی از اصطکاک با استفاده از رابطه ۳ برای شبکه تهویه معدن تخت محاسبه شده است [۱۷]:

طول، محیط و مساحت حفریه‌های معدنی برای محاسبه مقاومت ناشی از اصطکاک با استفاده از نقشه معدن (شکل ۱) به دست آمده که در جدول ۳ درج شده است. با استفاده از اطلاعات موجود در جدول‌های ۲ و ۳ و رابطه ۳ مقاومت اصطکاکی هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه معدن محاسبه شد که در ستون مقاومت اصطکاکی جدول ۳ ارایه شده است.

جدول ۳- مقاومت ناشی از اصطکاک و مشخصات شاخه‌های شبکه تهویه تخت.

شماره حفریه معدنی	گره آغازین	گره انتهایی	نوع حفریه معدنی	طول (متر)	محیط (متر)	سطح مقطع (متر مربع)	ضریب اصطکاک (در سیستم متریک)	مقاومت اصطکاکی (مورگ)
۱	۱۱	۱۰	تونل	۸۳	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۹,۸۴
۲	۲	۱۳	کارگاه	۸۳	۸,۵۴	۳,۸۲	۰,۰۰۴۵	۶۹۴
۳	۷	۱۷	کارگاه	۸۷	۸,۵۴	۳,۸۲	۰,۰۰۴۵	۷۲۶
۴	۹	۱۶	کارگاه	۸۷	۸,۵۴	۳,۸۲	۰,۰۰۴۵	۷۲۶
۵	۱۰	۱۵	کارگاه	۸۷	۸,۵۴	۳,۸۲	۰,۰۰۴۵	۷۲۶
۶	۳	۱۲	کارگاه	۸۳	۸,۵۴	۳,۸۲	۰,۰۰۴۵	۶۹۴
۷	۱۰	۹	تونل	۲۸	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۳
۸	۹	۸	تونل	۳۹	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۵
۹	۸	۷	تونل	۱۱۳	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۱۳
۱۰	۸	۴	دویل تهویه	۱۳۰	۶	۲,۲	۰,۰۰۰۳	۲۰۵
۱۱	۷	۶	تونل	۳۹	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۵
۱۲	۶	۵	دویل تهویه	۱۳۱	۶	۲,۲	۰,۰۰۰۳	۲۰۸
۱۳	۵	۴	تونل	۱۵۲	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۱۸
۱۴	۴	۳	تونل	۴۷۵	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۵۶
۱۵	۳	۲	تونل	۴۰	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۵
۱۶	۲	۱	تونل	۴۷	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۶
۱۷	۱۷	۱۶	تونل	۳۶	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۴
۱۸	۱۶	۱۵	تونل	۲۴	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۳
۱۹	۱۵	۱۴	تونل	۱۸	۹,۳۵	۶	۰,۰۰۱۹	۲

۳-۲-۲- محاسبه شدت جریان

شدت جریان در هر شاخه، دیگر مولفه برداری هر شاخه از شبکه معدن است. شاخه‌ها در یک شبکه تهویه وظیفه‌ای مشخص بر عهده دارند. شدت جریان هوای لازم با توجه به کاربری هر شاخه ممکن است بر اساس یکی از موارد زیر محاسبه شود [۱۸]:

الف- شدت جریان هوای لازم برای پرسنل

$$Q_1 = 6N \quad (۴)$$

که در آن:

N تعداد نفرات

Q_1 شدت جریان هوای مورد نیاز (متر مکعب در دقیقه)

ب- شدت جریان هوا برای رقیق‌سازی گازهای حاصل از

آتشباری برای جبهه کارهای آماده‌سازی.

هوای لازم برای رقیق کردن گازهای حاصل از انفجار در مرحله پیشروی از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$Q_2 = 500 \frac{A}{t} \quad (۵)$$

که در آن:

Q_2 شدت جریان مورد نیاز بر حسب (متر مکعب در دقیقه)

t مدت زمان تهویه جبهه‌کار (دقیقه)

A وزن ماده منفجره مصرفی در جبهه‌کار پیشروی (کیلوگرم)

پ- شدت جریان هوا برای رقیق کردن زغال:

$$Q_3 = \frac{100q}{D-D_0} \quad (۶)$$

که در آن:

Q_3 شدت جریان هوای مورد نیاز (مترمکعب در دقیقه)

q مقدار تصاعد گاز برحسب (مترمکعب در دقیقه)

D عیار مجاز گاز منتشر شده (درصد)

D_0 عیار گاز منتشر شده در مسیر ورودی هوا (درصد)

ت- شدت جریان بر اساس حداقل سرعت

مقادیر سرعت مجاز در بخش‌های مختلف معدن در جدول

۴ آمده است.

جدول ۴- سرعت مجاز در قسمت‌های مختلف معدن [۱۸].

شماره حفریه معدنی	نوع حفریه معدنی	شدت جریان (مترمکعب در ثانیه)
۱	تونل	۱۵٫۲۶
۲	کارگاه	۱٫۴۲
۳	کارگاه	۳٫۳۷
۴	کارگاه	۳٫۰۲
۵	کارگاه	۵٫۲۴
۶	کارگاه	۲٫۱۲
۷	تونل	۱۲٫۱۷
۸	تونل	۶٫۸۳
۹	تونل	۱٫۳۳
۱۰	دویل تهویه	۰٫۴۵
۱۱	تونل	۰٫۴۷
۱۲	دویل تهویه	۰٫۴۷
۱۳	تونل	۰٫۴۷
۱۴	تونل	۷٫۱۱
۱۵	تونل	۵٫۰۴
۱۶	تونل	۴٫۰۴
۱۷	تونل	۳٫۳۷
۱۸	تونل	۱٫۶۴
۱۹	تونل	۵٫۲۶

سرعت مجاز (متر در ثانیه)	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

شدت جریان هر شاخه از شبکه تهویه با توجه به کاربری شاخه و روابط ۴ تا ۶ و جدول ۴ محاسبه شده است. در شاخه‌های با کاربری‌های چندگانه بیشینه مقدار محاسبه شده به عنوان شدت جریان آن شاخه منظور شده است. با استفاده از رابطه افت فشار (رابطه ۷) و روش حل هاردی کراس شبکه تهویه تحلیل شد [۱۷].

$$\Delta P = RQ^2 \quad (7)$$

مشخصات بادبزن استفاده شده برای تولید شدت جریان محاسبه شده در جدول ۵ درج شده است.

جدول ۵- مشخصات بادبزن شبکه تهویه معدن تخت

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

شدت جریان‌های هر شاخه از شبکه پس از ۱۰ تکرار همگرا شد که نتایج در جدول ۶ آمده است.

۴- فرآیند تحلیل حساسیت

الگوی رفتاری شاخه‌های تشکیل‌دهنده یک سیستم تهویه از نظر تغییرات شدت جریان هوا در تونل‌های معدنی بر اساس مقاومتی است که موانع گوناگون در مسیر جریان هوا تولید می‌کنند.

برخی از عوامل تولیدکننده افت، موانع دینامیک‌اند، از این رو مدت زمان و محل استقرار مانع در مسیر جریان هوا متفاوت است. بنابراین در این تحقیق تغییرات مقاومت به عنوان ورودی مدل تحلیل حساسیت تهیه شده برای شبکه تهویه معدن، انتخاب شده است.

با در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در مقدار و مدت زمان اعمال مقاومت ناشی از موانع در تونل اصلی تغییرات مقاومت برای تونل اصلی شماره ۱ که متصل‌کننده گره ۱۰ به ۱۱ است به عنوان پارامتر ورودی انتخاب شد. تغییر مقاومت شاخه ۱ به صورت صعودی و نزولی با اختلاف ۱۰ درصد در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- تغییرات مقاومت شاخه ۱ به صورت تغییرات ۱۰ درصدی.

تغییرات مقاومت تونل اصلی (مورگ)	تغییرات صعودی مقاومت تونل اصلی (مورگ)	درصد تغییرات
۹,۸۴	۹,۸۴	۰
۸,۸۵	۱۰,۸۲	۱۰
۷,۸۷	۱۱,۸۰	۲۰
۶,۸۸	۱۲,۷۹	۳۰
۵,۹	۱۳,۷۷	۴۰
۴,۹۲	۱۴,۷۶	۵۰
۳,۹۳	۱۵,۷۴	۶۰
۲,۹۲	۱۶,۷۲	۷۰
۱,۹۶	۱۷,۷۱	۸۰
۰,۹۸	۱۸,۷۰	۹۰
۰,۰۹۸	۱۹,۶۸	۱۰۰

منفی معرف معکوس بودن ارتباط بین تغییر مقاومت و به تبع آن تغییرات شدت جریان است به این ترتیب که با افزایش مقدار مقاومت شدت جریان در شاخه کاهش پیدا کرده است.

هر چه مقدار شیب تفاضل بدون در نظر گرفتن علامت آن بزرگتر باشد، با علم به ثابت بودن شیب تغییرات مقاومت، نشان دهنده تغییرات بزرگتری در مقدار شدت جریان است. مقادیر هر ستون از جدول ۹ معرف شیب تفاضل شدت جریان هر یک از شاخه‌های تشکیل دهنده شبکه تهویه به ازای تغییر ۱۰ درصدی مقاومت تونل اصلی شماره ۱ است.

هدف از آنالیز حساسیت با توجه به تعریف ارائه شده از آن، شناسایی حساس‌ترین پارامتر خروجی نسبت به تغییر پارامترهای ورودی است. برای شناسایی حساس‌ترین شاخه نسبت به تغییر مقاومت با استفاده از نتایج جدول ۷، نمودار تغییر مقاومت نسبت شیب تفاضل محدود شدت جریان در هر شاخه برای همه شاخه‌های شبکه تهویه معدن تحت مطابق شکل ۳ تهیه شده است.

۵- بحث و تحلیل نتایج

برای شناسایی رفتار هر یک از شاخه‌ها شیب خطی همه شاخه‌ها بر اساس شکل ۳ محاسبه شده است (جدول ۱۰). نتایج نشان داد که تغییرات شدت جریان نسبت به تغییر مقاومت به جز در دو شاخه خطی تغییر است. بر اساس نتایج به دست آمده، در ۸۳ درصد از حفریه‌های معدنی با افزایش مقاومت همان‌گونه که انتظار می‌رود شدت جریان کاهش پیدا کرده است. بیشترین شیب تفاضل منفی، مربوط به حفریه معدنی شماره ۱۹ بوده است. آهنگ تغییرات شیب تفاضل شدت جریان تونل اصلی (حفریه معدنی شماره ۱۹)، نسبت به تغییر مقاومت تونل شماره ۱ در شکل ۴ ارائه شده است. مطابق شبکه معدن (شکل ۲)، این حفریه معدنی شاخه متصل کننده گره ۱۴ به گره ۱۵ است و تونل متصل به هوای آزاد و در تراز ارتفاعی ۸۱۲+ از سطح دریا واقع شده است. وظیفه این تونل خارج کردن هوای حاصل از تهویه بخش‌های مختلف از معدن است. شدت جریان مورد نیاز برای تهویه تونل شماره ۱۹ بر اساس تحلیل شبکه، معادل ۵,۲۶ مترمکعب در ثانیه معرفی شد. با افزایش ۱۰۰ درصدی مقاومت در تونل ۱، شدت جریان کاهش پیدا کرد (۳,۷۵ مترمکعب در ثانیه) و پس از کاهش ۱۰۰ درصدی مقاومت، شدت جریان معادل ۷,۷۲ مترمکعب در ثانیه شد. از آنجا که وظیفه اصلی تونل، خارج کردن هوای آلوده از بخش‌های مختلف معدن به بیرون است. با در نظر گرفتن سطح مقطع (جدول ۳)، سرعت هوا در این تونل پس از کاهش ۱۰۰ درصدی مقاومت، ۰,۶۲ متر بر ثانیه به دست آمده است که با توجه به استاندارد سرعت هوا در تونل‌های باربری این شاخه وظیفه خود را به عنوان انتقال دهنده هوا به خارج از معدن انجام داده است.

مقاومت شاخه ۱ با روند ثابت ۱۰ درصد به صورت صعودی و نزولی تغییر داده شد که نتیجه در جدول ۷ ارائه شده است. ۲۰ مقدار متفاوت برای مقاومت شاخه ۱ در تحلیل وارد و شدت جریان همه شاخه‌های شبکه برای مقدار جدید مقاومت محاسبه شده است. شدت جریان متناظر برای همه شاخه‌های شبکه تهویه در جدول ۸ نشان داده شده است.

با استفاده از تعریف ارائه شده برای آنالیز حساسیت به روش مشتقات جزئی که در رابطه ۳ به آن اشاره شد، حساسیت شدت جریان بعد از تغییر مقاومت در تونل اصلی، در هر شاخه از رابطه ۸ محاسبه شده است:

(۸)

$$\text{شدت جریان اولیه} - \text{شدت جریان پس از تغییر مقاومت} \times 100$$

شدت جریان اولیه

به ازای هر بار تغییر مقاومت در تونل اصلی، ۱۹ مقدار به دست آمد که معرف شیب تفاضل محدود شدت جریان هر شاخه نسبت به مقدار اولیه آن در فاز طراحی است (جدول ۹). برای تحلیل شیب‌های تفاضل به دست آمده علامت و مقدار شیب تفاضل مورد بررسی قرار گرفت.

با تغییر مقاومت، شیب تفاضل به صورت مثبت و منفی تغییر کرد. شیب مثبت معرف همسو بودن تغییرات پارامتر ورودی و خروجی با یکدیگر است، به این معنی که با افزایش مقاومت شدت جریان در شاخه افزایش پیدا کرده است. شیب

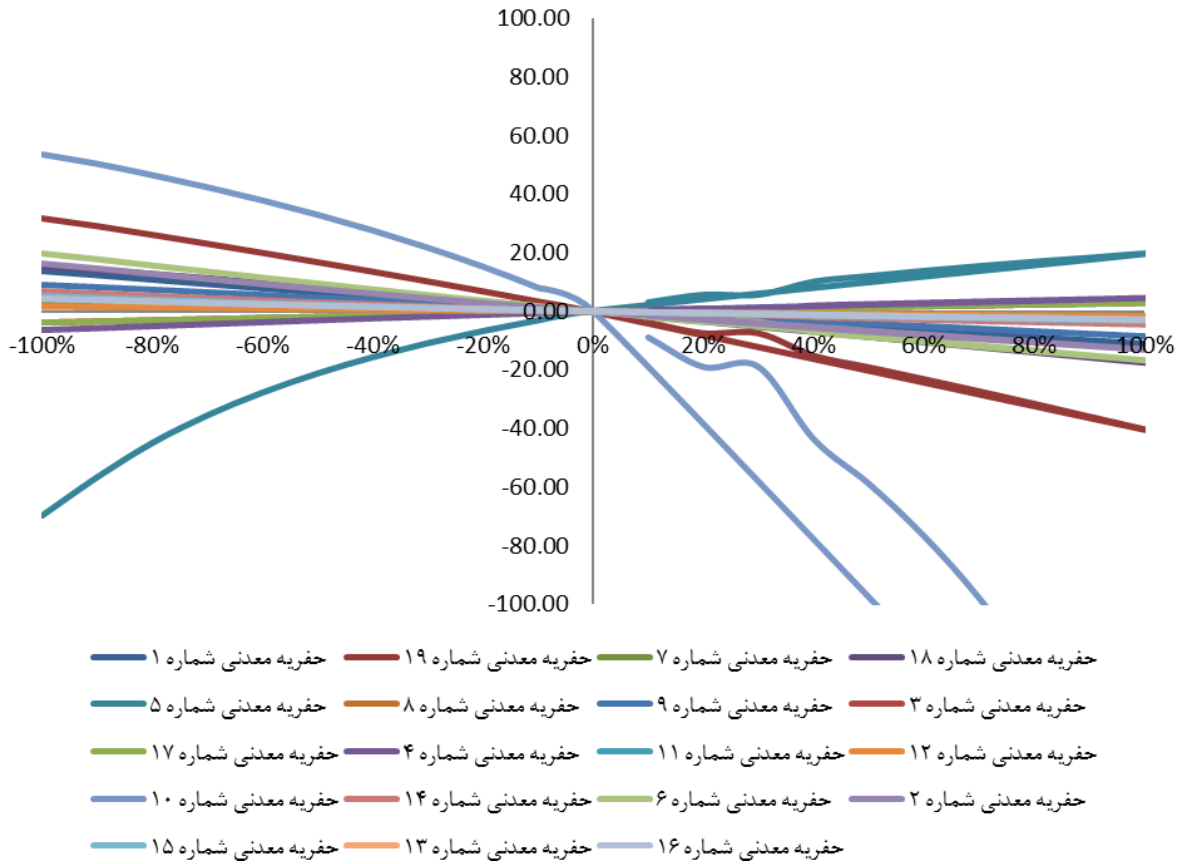
جدول ۸- شدت جریان شاخه‌های متناظر شبکه تهویه بر اساس تغییرات صعودی و نزولی مقاومت در شاخه ۱.

شماره حفریه معدنی	شدت جریان شاخه‌های متناظر شبکه تهویه																			
	تغییرات صعودی مقاومت شاخه ۱										تغییرات نزولی مقاومت شاخه ۱									
	%۱۰	%۲۰	%۳۰	%۴۰	%۵۰	%۶۰	%۷۰	%۸۰	%۹۰	%۱۰۰	-%۱۰	-%۲۰	-%۳۰	-%۴۰	-%۵۰	-%۶۰	-%۷۰	-%۸۰	-%۹۰	-%۱۰۰
۱	۱۵,۰۸	۱۴,۹۰	۱۴,۷۳	۱۴,۵۷	۱۴,۴۲	۱۴,۲۸	۱۴,۱۴	۱۴,۰۰	۱۳,۸۷	۱۳,۷۵	۱۵,۴۵	۱۵,۶۵	۱۵,۸۷	۱۶,۰۹	۱۶,۳۳	۱۶,۵۸	۱۶,۸۵	۱۷,۱۳	۱۷,۴۳	۱۷,۷۲
۲	۱,۴۰	۱,۳۸	۱,۳۶	۱,۳۵	۱,۳۳	۱,۳۱	۱,۳۰	۱,۲۸	۱,۲۷	۱,۲۶	۱,۴۴	۱,۴۶	۱,۴۹	۱,۵۱	۱,۵۴	۱,۵۷	۱,۶۰	۱,۶۳	۱,۶۷	۱,۷۰
۳	۳,۲۸	۳,۲۹	۳,۲۹	۳,۴۲	۳,۴۳	۳,۴۴	۳,۴۵	۳,۴۶	۳,۴۷	۳,۴۸	۳,۳۶	۳,۳۵	۳,۳۳	۳,۳۲	۳,۳۱	۳,۲۹	۳,۲۸	۳,۲۷	۳,۲۵	۳,۲۴
۴	۳,۰۴	۳,۰۵	۳,۰۵	۳,۰۸	۳,۱۰	۳,۱۱	۳,۱۲	۳,۱۴	۳,۱۵	۳,۱۶	۳,۰۰	۲,۹۹	۲,۹۷	۲,۹۵	۲,۹۳	۲,۹۲	۲,۹۰	۲,۸۸	۲,۸۶	۲,۸۴
۵	۵,۴۰	۵,۵۴	۵,۵۴	۵,۸۲	۵,۹۴	۶,۰۷	۶,۱۸	۶,۲۹	۶,۴۰	۶,۵۰	۵,۰۸	۴,۹۰	۴,۷۲	۴,۵۳	۴,۳۲	۴,۱۰	۳,۸۷	۳,۶۱	۳,۳۵	۳,۰۹
۶	۲,۱۲	۲,۰۸	۲,۰۶	۲,۰۲	۱,۹۹	۱,۹۶	۱,۹۳	۱,۹۰	۱,۸۸	۱,۸۵	۲,۲۰	۲,۲۴	۲,۲۹	۲,۳۴	۲,۳۹	۲,۴۴	۲,۵۰	۲,۵۶	۲,۶۳	۲,۶۹
۷	۱۲,۱۵	۱۲,۱۲	۱۲,۱۲	۱۲,۰۷	۱۲,۰۴	۱۲,۰۲	۱۱,۹۹	۱۱,۹۷	۱۱,۹۵	۱۱,۹۲	۱۲,۲۰	۱۲,۲۳	۱۲,۲۶	۱۲,۲۹	۱۲,۳۲	۱۲,۳۶	۱۲,۳۹	۱۲,۴۲	۱۲,۴۵	۱۲,۴۸
۸	۶,۸۲	۶,۸۱	۶,۸۱	۶,۷۸	۶,۷۷	۶,۷۶	۶,۷۵	۶,۷۴	۶,۷۳	۶,۷۲	۶,۸۴	۶,۸۵	۶,۸۷	۶,۸۸	۶,۸۹	۶,۹۱	۶,۹۲	۶,۹۳	۶,۹۵	۶,۹۶
۹	۱,۳۲	۱,۳۱	۱,۳۱	۱,۲۸	۱,۲۷	۱,۲۶	۱,۲۵	۱,۲۴	۱,۲۳	۱,۲۲	۱,۳۴	۱,۳۵	۱,۳۷	۱,۳۸	۱,۳۹	۱,۴۱	۱,۴۲	۱,۴۳	۱,۴۵	۱,۴۶
۱۰	۰,۴۲	۰,۳۸	۰,۳۸	۰,۳۲	۰,۲۹	۰,۲۶	۰,۲۳	۰,۲۱	۰,۱۸	۰,۱۶	۰,۵۰	۰,۵۴	۰,۵۸	۰,۶۳	۰,۶۸	۰,۷۴	۰,۷۹	۰,۸۵	۰,۹۲	۰,۹۸
۱۱	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۵
۱۲	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۵
۱۳	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۴	۰,۴۵
۱۴	۷,۰۷	۷,۰۴	۷,۰۴	۶,۹۷	۶,۹۴	۶,۹۱	۶,۸۸	۶,۸۵	۶,۸۳	۶,۸۰	۷,۱۵	۷,۱۹	۷,۲۴	۷,۲۹	۷,۳۴	۷,۳۹	۷,۴۵	۷,۵۱	۷,۵۸	۷,۶۵
۱۵	۵,۰۲	۵,۰۰	۴,۹۹	۴,۹۷	۴,۹۵	۴,۹۴	۴,۹۲	۴,۹۱	۴,۸۹	۴,۸۸	۵,۰۶	۵,۰۹	۵,۱۱	۵,۱۴	۵,۱۶	۵,۱۹	۵,۲۲	۵,۲۵	۵,۲۹	۵,۳۲
۱۶	۴,۰۳	۴,۰۲	۴,۰۰	۳,۹۹	۳,۹۸	۳,۹۷	۳,۹۶	۳,۹۵	۳,۹۴	۳,۹۳	۴,۰۶	۴,۰۷	۴,۰۹	۴,۱۰	۴,۱۲	۴,۱۴	۴,۱۶	۴,۱۸	۴,۲۰	۴,۲۲
۱۷	۳,۲۸	۳,۲۹	۳,۲۹	۳,۴۲	۳,۴۳	۳,۴۴	۳,۴۵	۳,۴۶	۳,۴۷	۳,۴۸	۳,۳۶	۳,۳۵	۳,۳۳	۳,۳۲	۳,۳۱	۳,۲۹	۳,۲۸	۳,۲۷	۳,۲۵	۳,۲۴
۱۸	۱,۶۵	۱,۶۲	۱,۶۲	۱,۵۷	۱,۵۴	۱,۵۲	۱,۴۹	۱,۴۷	۱,۴۵	۱,۴۲	۱,۷۰	۱,۷۳	۱,۷۶	۱,۷۹	۱,۸۲	۱,۸۶	۱,۸۹	۱,۹۲	۱,۹۵	۱,۹۸
۱۹	۵,۰۸	۴,۹۰	۴,۹۰	۴,۵۷	۴,۴۲	۴,۲۸	۴,۱۴	۴,۰۰	۳,۸۷	۳,۷۵	۵,۴۵	۵,۶۵	۵,۸۷	۶,۰۹	۶,۳۳	۶,۵۸	۶,۸۵	۷,۱۳	۷,۴۳	۷,۷۲

جدول ۹- شیب تفاضل تغییرات شدت جریان به ازای تغییر مقاومت برای حفریه‌های معدنی.

درصد تغییرات مقاومت شاخه ۱	شماره حفریه معدنی																		
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹
٪۱۰	-۱٫۲۲	-۱٫۴۴	۰٫۳۵	۰٫۵۳	۲٫۸۸	-۱٫۸۱	-۰٫۲۳	-۰٫۱۷	-۰٫۹۰	-۸٫۹۵	-۰٫۱۷	-۰٫۱۷	-۰٫۳۳	-۰٫۵۴	-۰٫۴۰	-۰٫۳۳	۰٫۳۵	-۱٫۷۰	-۳٫۶۱
٪۲۰	-۲٫۴۰	-۲٫۸۴	۰٫۶۹	۱٫۰۴	۵٫۴۶	-۳٫۵۸	-۰٫۴۶	-۰٫۳۴	-۱٫۸۰	-۱۹٫۰۴	-۰٫۳۴	-۰٫۳۴	-۰٫۶۴	-۱٫۰۶	-۰٫۷۸	-۰٫۶۴	۰٫۶۹	-۳٫۴۲	-۷٫۳۱
٪۳۰	-۳٫۵۶	-۴٫۲۱	۰٫۶۹	۱٫۰۴	۵٫۴۶	-۳٫۵۸	-۰٫۴۶	-۰٫۳۴	-۱٫۸۰	-۱۹٫۰۴	-۰٫۳۴	-۰٫۳۴	-۰٫۹۵	-۱٫۰۶	-۱٫۱۵	-۰٫۹۵	۰٫۶۹	-۳٫۴۲	-۷٫۳۱
٪۴۰	-۴٫۶۹	-۵٫۵۴	۱٫۳۴	۲٫۰۱	۹٫۹۰	-۷٫۰۴	-۰٫۸۹	-۰٫۶۷	-۳٫۵۷	-۴۳٫۶۵	-۰٫۶۶	-۰٫۶۶	-۱٫۲۴	-۲٫۰۴	-۱٫۵۰	-۱٫۲۴	۱٫۳۴	-۶٫۸۹	-۱۴٫۹۵
٪۵۰	-۵٫۸۰	-۶٫۸۴	۱٫۶۵	۲٫۴۷	۱۱٫۸۳	-۸٫۷۲	-۱٫۱۱	-۰٫۸۳	-۴٫۴۴	-۵۸٫۸۶	-۰٫۸۱	-۰٫۸۱	-۱٫۵۲	-۲٫۵۰	-۱٫۸۴	-۱٫۵۲	۱٫۶۵	-۸٫۶۴	-۱۸٫۹۱
٪۶۰	-۶٫۸۸	-۸٫۱۲	۱٫۹۵	۲٫۹۱	۱۳٫۵۹	-۱۰٫۳۷	-۱٫۳۱	-۰٫۹۹	-۵٫۳۱	-۷۶٫۶۸	-۰٫۹۶	-۰٫۹۶	-۱٫۷۹	-۲٫۹۴	-۲٫۱۶	-۱٫۷۹	۱٫۹۵	-۱۰٫۴۰	-۲۲٫۹۶
٪۷۰	-۷٫۹۳	-۹٫۳۶	۲٫۲۴	۳٫۳۴	۱۵٫۲۱	-۱۱٫۹۹	-۱٫۵۱	-۱٫۱۴	-۶٫۱۷	-۹۷٫۸۲	-۱٫۱۰	-۱٫۱۰	-۲٫۰۵	-۳٫۳۶	-۲٫۴۷	-۲٫۰۵	۲٫۲۴	-۱۲٫۱۷	-۲۷٫۱۱
٪۸۰	-۸٫۹۷	-۱۰٫۵۷	۲٫۵۲	۳٫۷۵	۱۶٫۷۰	-۱۳٫۵۸	-۱٫۷۱	-۱٫۲۹	-۷٫۰۱	-۱۲۳٫۳۱	-۱٫۲۴	-۱٫۲۴	-۲٫۳۱	-۳٫۷۷	-۲٫۷۷	-۲٫۳۱	۲٫۵۲	-۱۳٫۹۴	-۳۱٫۳۷
٪۹۰	-۹٫۹۸	-۱۱٫۷۶	۲٫۷۹	۴٫۱۴	۱۸٫۰۸	-۱۵٫۱۴	-۱٫۹۰	-۱٫۴۴	-۷٫۸۵	-۱۵۴٫۶۵	-۱٫۳۷	-۱٫۳۷	-۲٫۵۵	-۴٫۱۶	-۳٫۰۵	-۲٫۵۵	۲٫۷۹	-۱۵٫۷۲	-۳۵٫۷۲
٪۱۰۰	-۱۰٫۹۶	-۱۲٫۹۲	۳٫۰۶	۴٫۵۳	۱۹٫۳۶	-۱۶٫۶۸	-۲٫۰۹	-۱٫۵۸	-۸٫۶۸	-۱۹۴٫۱۱	-۱٫۵۰	-۱٫۵۰	-۲٫۷۸	-۴٫۵۴	-۳٫۳۳	-۲٫۷۸	۳٫۰۶	-۱۷٫۵۱	-۴۰٫۱۹
٪۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
-٪۱۰	۱٫۲۵	۱٫۴۷	-۰٫۳۶	-۰٫۵۵	-۳٫۲۳	۱٫۸۴	۰٫۲۴	۰٫۱۸	۰٫۹۰	۷٫۹۹	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۳۴	۰٫۵۷	۰٫۴۲	۰٫۳۴	-۰٫۳۶	۱٫۶۹	۳٫۵۳
-٪۲۰	۲٫۵۲	۲٫۹۸	-۰٫۷۳	-۱٫۱۲	-۶٫۸۷	۳٫۷۲	۰٫۴۷	۰٫۳۶	۱٫۸۱	۱۵٫۱۶	۰٫۳۶	۰٫۳۶	۰٫۷۰	۱٫۱۶	۰٫۸۶	۰٫۷۰	-۰٫۷۳	۳٫۳۵	۶٫۹۹
-٪۳۰	۳٫۸۴	۴٫۵۳	-۱٫۱۲	-۱٫۷۱	-۱۱٫۰۳	۵٫۶۳	۰٫۷۲	۰٫۵۴	۲٫۷۲	۲۱٫۶۴	۰٫۵۴	۰٫۵۴	۱٫۰۷	۱٫۷۸	۱٫۳۲	۱٫۰۷	-۱٫۱۲	۵٫۰۰	۱۰٫۳۷
-٪۴۰	۵٫۱۸	۶٫۱۲	-۱٫۵۱	-۲٫۳۲	-۱۵٫۷۹	۷٫۵۸	۰٫۹۷	۰٫۷۳	۳٫۶۳	۲۷٫۵۲	۰٫۷۳	۰٫۷۳	۱٫۴۶	۲٫۴۳	۱٫۸۰	۱٫۴۶	-۱٫۵۱	۶٫۶۲	۱۳٫۶۸
-٪۵۰	۶٫۵۶	۷٫۷۵	-۱٫۹۱	-۲٫۹۵	-۲۱٫۳۳	۹٫۵۶	۱٫۲۲	۰٫۹۲	۴٫۵۴	۳۲٫۸۸	۰٫۹۲	۰٫۹۲	۱٫۸۷	۳٫۱۱	۲٫۳۱	۱٫۸۷	-۱٫۹۱	۸٫۲۱	۱۶٫۹۲
-٪۶۰	۷٫۹۸	۹٫۴۳	-۲٫۳۲	-۳٫۶۰	-۲۷٫۸۴	۱۱٫۵۸	۱٫۴۷	۱٫۱۱	۵٫۴۴	۳۷٫۷۸	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۲٫۳۰	۳٫۸۳	۲٫۸۵	۲٫۳۰	-۲٫۳۲	۹٫۷۸	۲۰٫۱۰
-٪۷۰	۹٫۴۳	۱۱٫۱۴	-۲٫۷۴	-۴٫۲۶	-۳۵٫۵۹	۱۳٫۶۴	۱٫۷۲	۱٫۳۰	۶٫۳۳	۴۲٫۲۸	۱٫۳۲	۱٫۳۲	۲٫۷۵	۴٫۵۸	۳٫۴۱	۲٫۷۵	-۲٫۷۴	۱۱٫۳۰	۲۳٫۲۰
-٪۸۰	۱۰٫۹۳	۱۲٫۹۱	-۳٫۱۶	-۴٫۹۴	-۴۴٫۹۹	۱۵٫۷۴	۱٫۹۸	۱٫۴۹	۷٫۲۰	۴۶٫۴۲	۱٫۵۲	۱٫۵۲	۳٫۲۲	۵٫۳۷	۴٫۰۱	۳٫۲۲	-۳٫۱۶	۱۲٫۷۸	۲۶٫۲۵
-٪۹۰	۱۲٫۴۶	۱۴٫۷۲	-۳٫۵۸	-۵٫۶۲	-۵۶٫۶۳	۱۷٫۸۸	۲٫۲۳	۱٫۶۸	۸٫۰۶	۵۰٫۲۵	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۳٫۷۲	۶٫۲۰	۴٫۶۳	۳٫۷۲	-۳٫۵۸	۱۴٫۲۱	۲۹٫۲۳
-٪۱۰۰	۱۳٫۸۸	۱۶٫۳۹	-۳٫۹۶	-۶٫۲۴	-۶۹٫۷۵	۱۹٫۸۴	۲٫۴۵	۱٫۸۵	۸٫۸۱	۵۳٫۴۶	۱٫۸۹	۱٫۸۹	۴٫۱۹	۶٫۹۹	۵٫۲۳	۴٫۱۹	-۳٫۹۶	۱۵٫۴۵	۳۱٫۸۷

درصد تغییرات شیب تفاضل شدت جریان در حفریه های معدنی

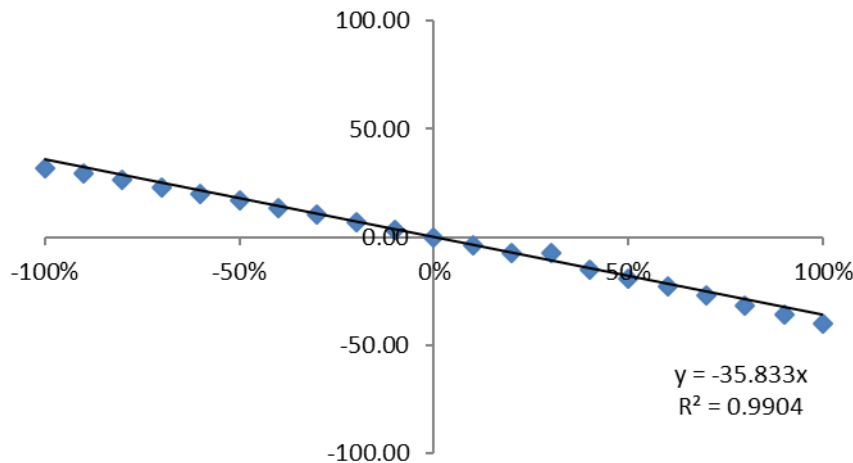


شکل ۳- تغییر مقاومت در حفریه معدنی شماره ۱ نسبت شیب تفاضل محدود شدت جریان برای همه شاخه‌های شبکه تهویه تخت.

جدول ۱۰- شیب خطی نمودار آهنگ تغییرات شدت جریان شاخه‌های شبکه تهویه معدن تخت نسبت به تغییر مقاومت تونل اصلی.

شماره حفریه معدنی	نوع حفریه معدنی	شیب خطی نمودارها
۱	تونل	-۱۲/۴۲
۲	کارگاه	-۱۴/۷
۳	کارگاه	۳/۵۳
۴	کارگاه	۵/۴
۶	کارگاه	-۱۸/۲
۷	تونل	-۲/۲۹
۸	تونل	-۱/۷۳
۹	تونل	-۸/۸۳
۱۱	تونل	-۱/۷۱
۱۲	دوویل تهویه	-۱/۷۱
۱۳	تونل	-۳/۴۵
۱۴	تونل	-۵/۶۸
۱۵	تونل	-۴/۲۲
۱۶	تونل	-۳/۴۵
۱۷	تونل	۳/۵۳
۱۸	تونل	-۱۶/۶
۱۹	تونل	-۳۵/۸۳

تغییرات شیب تفاضل شدت جریان در حفریه معدنی شماره ۱۹



شکل ۴- آهنگ تغییرات شیب تفاضل شدت جریان تونل اصلی (حفریه معدنی شماره ۱۹) نسبت به تغییر مقاومت تونل شماره ۱

۵/۴ مربوط به کارگاه استخراج با شماره حفریه ۴ است. با افزایش مقاومت، شدت جریان در این شاخه از ۳/۰۳ به ۳/۴۸ افزایش پیدا کرده است و این در حالی است که با کاهش مقاومت در شاخه ۱ شدت جریان در این کارگاه تا ۲/۸۴ کاهش پیدا کرده است (جدول ۶) با توجه به سطح مقطع کارگاه (جدول ۳) سرعت در کارگاه شماره ۴ در بیشترین حالت ۰/۹ متر بر ثانیه و کمترین مقدار سرعت ۰/۷ متر بر ثانیه به دست آمد. با توجه به جدول ۴ حداقل سرعت مجاز در کارگاه استخراج ۱ متر بر ثانیه است که با توجه به مقادیر مجاز حداقل سرعت در هیچ یک از دو حالت افزایش مقاومت و کاهش مقاومت حفریه معدنی شماره ۴ وظیفه خود را به خوبی انجام نداده است. البته این به معنی از کارافتادگی کامل شاخه نیست بلکه با راندمان کمتری از میزان انتظار وظیفه خود را انجام داده است.

در شبکه تهویه معدن تخت تنها دو حفریه از معدن در مقابل تغییر مقاومت در شاخه ۱ به صورت غیرخطی عمل می‌کنند. تغییرات شدت جریان برای حفریه معدنی شماره ۱۰ که وظیفه انتقال هوا از تونل دنباله‌رو لایه واقع در تراز ارتفاعی بالاتر به پایین‌تر را به عهده دارد، به صورت غیرخطی با شیب منفی تغییر کرده که در شکل ۵ به آن اشاره شده است. با افزایش مقاومت، شدت جریان با شیب زیاد در حال کاهش است، به گونه‌ای که مقدار شدت جریان با افزایش ۱۰۰ درصد مقاومت در شاخه ۱ به ۰/۱۶ مترمکعب بر ثانیه کاهش پیدا کرده است. با توجه افزایش شیب نمودار با افزایش مقاومت، شدت جریان در دوپل تهویه شماره ۱۰ به صفر نزدیک شده است. از آنجا که وظیفه انتقال هوا از تراز ارتفاعی ۷۶۶+ به ۷۲۲+ است با از کار افتادن این شاخه شبکه، تهویه کارایی مورد نظر را نخواهد داشت.

تونل شماره ۱۹ در تراز ارتفاعی بالاتری (۸۱۲+) نسبت دو تونل دیگر معدن واقع شده است. با توجه به اختلاف ارتفاع مسیرها ورودی (کانال تهویه) و مسیر خروجی (تونل شماره ۱۹) و دمای مربوط به آن‌ها فشار تهویه طبیعی مطابق جدول ۱۱ محاسبه شد.

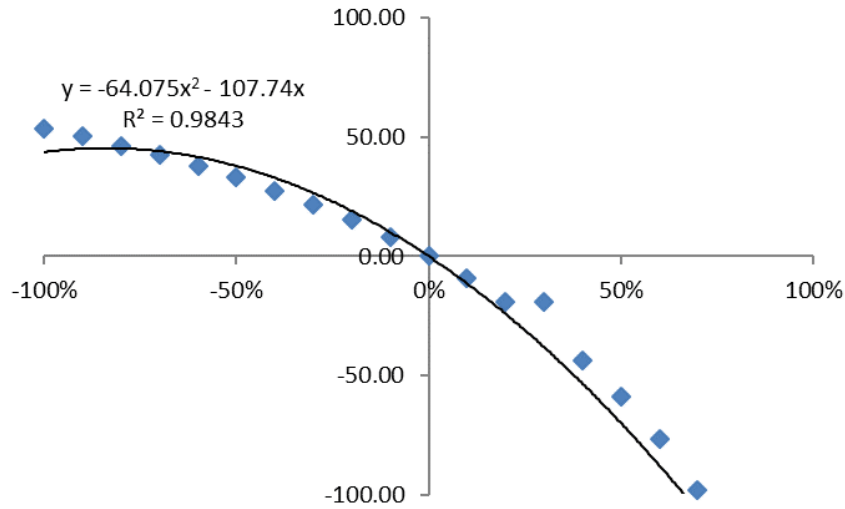
جدول ۱۱- مشخصات تهویه طبیعی تونل شماره ۱۹.

شرح	بیرون معدن	داخل معدن
دما (سانتی‌گراد)	۳۰	۱۸
وزن مخصوص هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱/۱۴	۱/۱۹
ارتفاع ستون هوا در مدخل تونل شماره ۱۹ (متر)	۹۳	
فشار تهویه طبیعی اندازه‌گیری شده در مدخل تونل شماره ۱۹ (پاسکال)	۴۵/۷۵	

بر اساس تهویه طبیعی در فصول سرد سال جریان تهویه طبیعی به جهت جریان در شبکه کمک می‌کند و این در حالی است که در فصول گرم تهویه طبیعی خلاف جهت جریان تهویه در حفریه معدنی مزبور است، بنابراین با توجه به حساسیت بالای این تونل نسبت به تغییرات مقاومت، وجود مانع در فصل‌های گرم دارای اهمیت است.

افزایش مقاومت در شاخه ۱، باعث افزایش شدت جریان در ۱۷ درصد شاخه‌های شبکه تهویه شده است. بنابراین شیب تفاضل نسبت به تغییر مقاومت مثبت است. به عبارت دیگر شدت جریان هوا در حفریات معدنی به شماره ۳، ۴ و ۱۷ با افزایش مقاومت، افزایش پیدا می‌کند. حفریه معدنی شماره ۳ و ۴ کارگاه استخراج و شماره ۱۷ تونل انتقال ماده معدنی است. بیشترین حساسیت تغییر شدت جریان در شاخه‌های اشاره شده، مقدار

تغییرات شیب تفاضل شدت جریان در حفریه معدنی شماره ۱۰



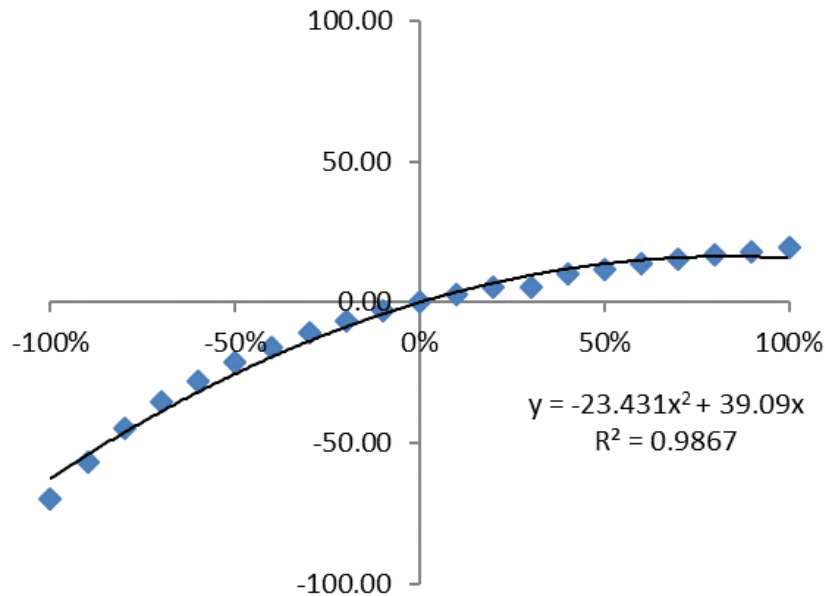
شکل ۵- آهنگ تغییرات شیب تفاضل شدت جریان دوپل تهویه (حفریه معدنی شماره ۱۰) نسبت به تغییر مقاومت تونل شماره ۱.

گونه که برای حفریه معدنی شماره ۴ اشاره شد، با تعریف یک سطح از اطمینان می‌توان گفت که وظیفه خود را انجام داده است.

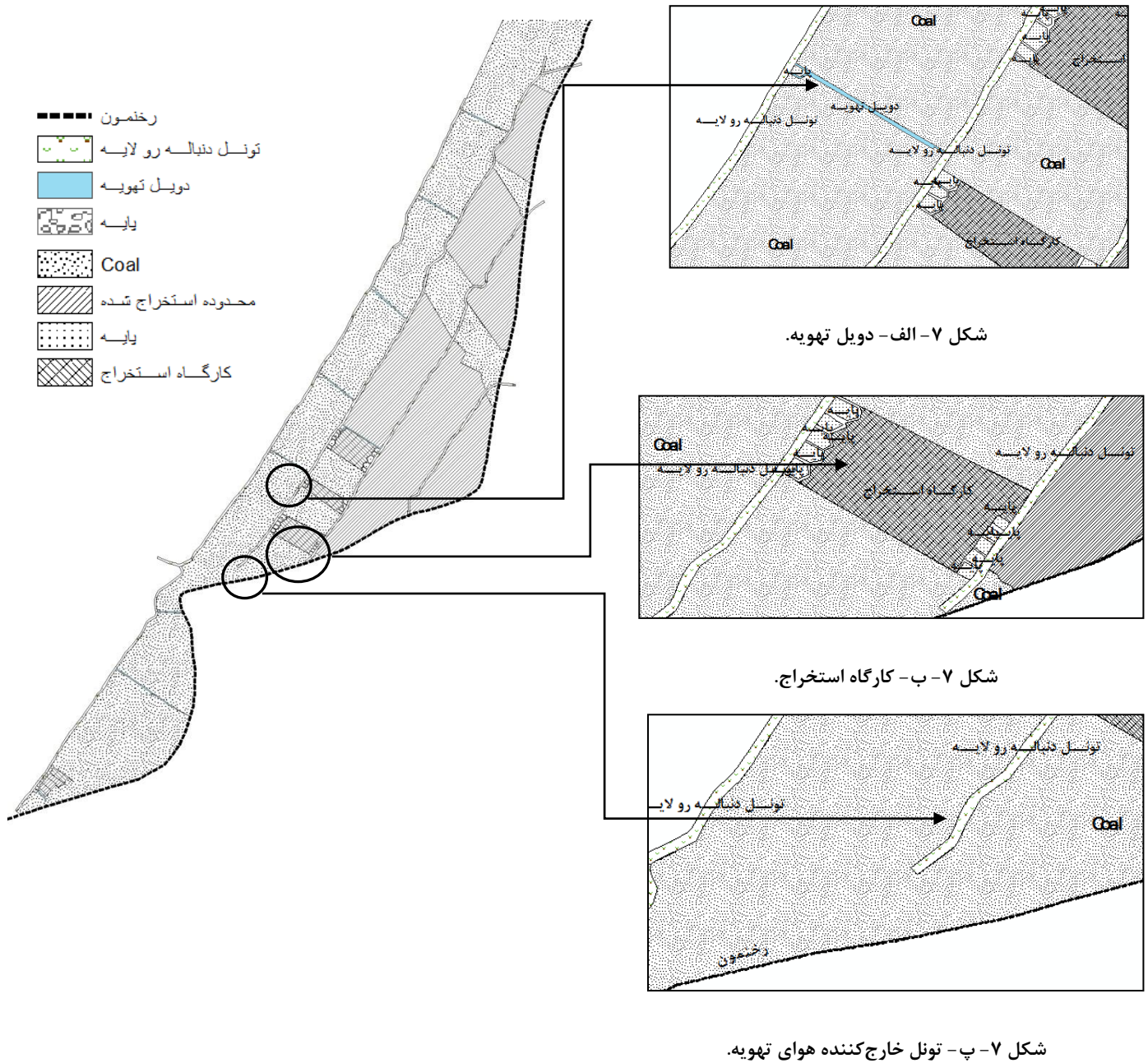
محل قرارگیری حفریه معدنی شماره ۱۰ (دوپل تهویه)، حفریه معدنی شماره ۵ (کارگاه استخراج) و حفریه معدنی شماره ۱۹ (تونل اصلی) در نمای افقی شبکه معدن تخت شکل ۷ نشان داده شده است.

آهنگ تغییرات شدت جریان در کارگاه استخراج (حفریه معدنی شماره ۵) نسبت به تغییر مقاومت تونل شماره ۱ غیرخطی با شیب مثبت است که در شکل ۶ به آن اشاره شده است. با توجه به بررسی سقف و کف سرعت مجاز در کارگاه، حداقل و حداکثر سرعت در این شاخه کمتر از مقدار مجاز حداقل سرعت در کارگاه استخراج بوده، بنابراین این شاخه وظیفه خود را به خوبی انجام نداده است. البته همان

تغییرات شیب تفاضل شدت جریان در حفریه معدنی شماره ۵



شکل ۶- آهنگ تغییرات شیب تفاضل شدت جریان کارگاه استخراج (حفریه معدنی شماره ۵) نسبت به تغییر مقاومت تونل شماره ۱



شکل ۷- الف - دوپل تهویه.

شکل ۷- ب - کارگاه استخراج.

شکل ۷- پ - تونل خارج کننده هوای تهویه.

شکل ۷- پلان معدن تخت.

۶- نتیجه گیری

تاثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی در مدل ریاضی شبکه تهویه با عنوان تحلیل حساسیت شبکه تهویه معدن تخت مطالعه شده است. برای تحلیل حساسیت شبکه تهویه ورودی به صورت سیستماتیک تغییر یافته و تاثیرات این تغییرها را در خروجی مدل محاسبه شده است. ابتدا بر اساس روابط موجود، افت فشار برای شبکه تهویه تخت معرفی و در ادامه با استفاده از روش هاردی کراس، شدت جریان شاخه‌های

شبکه تهویه تخت برای مقاومت ثابت محاسبه شد. از آنجا که تونل‌هایی که وظیفه حمل و نقل مواد معدنی حاصل از استخراج و پرسنل را به عهده دارند، اغلب تحت تاثیر موانع دینامیک‌اند، این موانع مقاومتی بر شبکه تهویه اعمال می‌کنند که سبب تغییر شدت جریان در شاخه‌های مزبور و در نتیجه در کل شبکه خواهند شد. بنابراین تغییر مقاومت در تونل اصلی معدن به عنوان متغیر ورودی برای تحلیل حساسیت شبکه تهویه انتخاب شده است. مقاومت به صورت سیستماتیک در هر مرحله ۱۰ درصد افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است. شدت

5. Zhang, G., Hong, Y., Yang, Q., Ji, H., & Lv, G. (2015). *Numerical Simulation of Energy Saving Potential in Dispersing Process of Blasted Smoke in Mines*. Journal of Harbin Institute of Technology, 4, 014
6. Massanés, M.B., L.S. Pera, and J.O. Moncunill. (2015) *Ventilation management system for underground environments*. Tunnelling and Underground Space Technology, 50: p. 516-522
7. Hitch, M. and G. Dipple. (2012) *Economic feasibility and sensitivity analysis of integrating industrial-scale mineral carbonation into mining operations*. Minerals Engineering, 39: p. 268-275
8. eqing, H.X.L.Z.G. and L. Xiao. (2007) *Numerical Simulation and Sensitivity Analysis of Slope Stability in Mine Transferred from Open Pit to Underground Mining [J]*. Metal Mine. 6: p. 002
9. Palei, S. and S. Das. (2008) *Sensitivity analysis of support safety factor for predicting the effects of contributing parameters on roof falls in underground coal mines*. International Journal of Coal Geology. 75(4): p. 241-247
10. Wang, Y. (2014) *The Airflow Abnormal Value Analysis of Mine Ventilation Network Based on the Sensitivity*. in *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publ.
11. Li, G., C. Kocsis, and S. Hardcastle. (2011) *Sensitivity analysis on parameter changes in underground mine ventilation systems*. Journal of Coal Science and Engineering (China). 17(3): p. 251-255.
12. Iman, R.L. and J.C. Helton. (1988) *An investigation of uncertainty and sensitivity analysis techniques for computer models*. Risk analysis, 8(1): p. 71-90.
13. Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B., & Wagener, T. (2016). *Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow*. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214-232
14. Hamby, D. (1994) *A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models*. Environmental monitoring and assessment, 32(2): p. 135-154.
15. Devenish, B., Francis, P., Johnson, B., Sparks, R., & Thomson, D. (2010) *Sensitivity analysis*

جریان همه شاخه‌های واقع در شبکه پس از اعمال تغییر مقاومت شاخه ۱ محاسبه شده و در جدول ۸ به نشان داده شده است. برای تحلیل حساسیت مدل از روش تفاضل مشتقات محدود استفاده شده است و تغییرات شدت جریان برای هر ۲۰ مرحله تغییر مقاومت در جدول ۹ ارایه شده است. برای هر بار تغییر مقاومت ۱۹ شدت جریان مقدار برای هر شاخه از شبکه به دست آمده است. به منظور تحلیل حساسیت شدت جریان شاخه در نتیجه تغییر مقاومت نمودار آهنگ تغییرات شیب تفاضل شدت جریان حفیره‌های معدنی نسبت به تغییر مقاومت تونل شماره ۱ ترسیم شده است (شکل ۳). در این تحقیق مقاومت ناشی از موانع به عنوان ورودی تحلیل حساسیت استفاده شد و مقدار آن به صورت ثابت و سیستماتیک کاهش و افزایش یافته است. این در حالی است که با توجه به طرح تهویه معدن و ترابری در معادن، تغییرات مقاومت ناشی از موانع به صورت کاملاً سیستماتیک تغییر نخواهد کرد و این تغییر تنها مختص یک شاخه از شبکه تهویه نخواهد بود. تغییرات مقاومت در پر ترددترین شاخه در شبکه تهویه به دلیل حجم بالای محاسبات در این تحقیق بررسی شده است در صورتی که تغییر مقاومت در همه شاخه‌ها محتمل است. تحقیقات آینده می‌توانند به بررسی نکات ارایه شده بپردازد.

منابع

1. Song, Y., Guo, X., Lv, W., Guo, H., & Li, R. (2017). *A SIMULATION STUDY ON THE RECONSTRUCTION OF COALMINE VENTILATION SYSTEM BASED ON WIND RESISTANCE CORRECTION*. International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM), 16(1).
2. Kurnia, J.C., A.P. Sasmito, and A.S. (2014) Mujumdar, *Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines*. Tunnelling and Underground Space Technology, 42: p. 206-215.
3. George, D., B. Davood, and M.-J. (2011) Pierre, *Ventilation and climate simulation with the Multiflux code*. Journal of Coal Science and Engineering (China), 17(3): p. 243.
4. Liu, Y., Wang, S., Deng, Y., Ma, W., & Ma, Y. (2016). *Numerical simulation and experimental study on ventilation system for powerhouses of deep underground hydropower stations*. Applied Thermal Engineering, 105, 151-158.

17. Young, D. F., Munson, B. R., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2010). *A brief introduction to fluid mechanics*: John Wiley & Sons.
18. Skochinsky, A., V. Komarov, and J.S. Scott. (1969) *Mine ventilation*.

of dispersion modeling of volcanic ash from Eyjafjallajökull. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117

۱۶. ربیع نژاد، ح.، خ. فعالیان، ا. الهی، (۱۳۸۷) تجزیه و تحلیل شبکه تهویه معدن رضی با استفاده از نرم افزار ونتسیم، دفتر فنی و طراحی معدن رضی.