

تحلیل شبکه تهویه معدن با روش گره - حلقه براساس دبی شاخه‌ها

بیژن ملکی^{۱*}، عزت اله مظفری^۲، ابوالفضل حاجی قربانی^۳

۱- استادیار، گروه معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- استادیار، گروه معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۳- کارشناس ارشد استخراج معدن، گروه معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(دریافت: مرداد ۱۳۹۲، پذیرش: دی ۱۳۹۵)

چکیده

انجام تهویه دقیق و صحیح معادن از مهم‌ترین مسائل مربوط به ایمنی معدن است. اجرای مناسب شبکه تهویه معدن مستلزم شناخت و تحلیل دقیق حرکت هوا در بخش‌های مختلف معدن است. محاسبات تهویه در معادن متوسط و بزرگ زیر زمینی از پیچیدگی زیادی برخوردار بوده و مستلزم بکارگیری مدل‌ها و روش‌های تقریبی ریاضی مناسب خواهد بود. از جمله روش‌های تقریبی، گره - حلقه است که تئوری خطی نیز نامیده می‌شود. در روش‌های هاردی - کراس و نیوتون - رافسون حدس اولیه منطبق با قانون گره کشف لازم است. این حدس اولیه در شبکه‌های بزرگ با دشواری صورت گرفته و وقت‌گیر است. در روش گره - حلقه نیاز به حدس اولیه مطابق با قانون گره نیست. مزیت دیگر این روش سرعت همگرایی بیشتر آن برای معادلات درجه دو است. ابتدا، روش گره - حلقه در تحلیل شبکه‌های برق و آب به کار گرفته شد، اما تا کنون در تهویه معدن مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله، شرح مختصری از مبانی شبکه‌های تهویه معدن و روش گره - حلقه بیان می‌شود. سپس، چگونگی استفاده از این روش به صورت ماتریسی در تهویه معدن بر اساس دبی شاخه‌ها بررسی شده است. در ادامه، معادلات بیان‌کننده شبکه و نحوه خطی سازی آنها بیان شده و نحوه حل عددی ارائه شده است. در پایان شبکه تهویه معدن پابدانا به روش گره - حلقه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این تحلیل بدون نیاز به دادن مقادیر تخمینی اولیه دبی، محاسبات به همگرایی منجر شد و توزیع هوا در بخش‌های مختلف معدن تعیین گردید.

کلید واژه‌ها

شبکه تهویه، توزیع هوا، روش گره - حلقه، معدن زغالسنگ پابدانا

ارجاع به این مقاله:

ملکی، ب.، مظفری، ع.، حاجی قربانی، الف.، (۱۳۹۵)، تحلیل شبکه تهویه معدن با روش گره - حلقه براساس دبی شاخه‌ها، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۲)، ۹-۱.

۱- مقدمه

دادند [۱۰]. جیا و همکاران (۲۰۱۳) مدل تصحیح کننده پارامترهای تهویه را بر پایه معادلات حلقه و مسیر ارائه دادند [۱۱]. اکثر مقالات اشاره شده سعی در خطی‌سازی معادلات انرژی حلقه‌ها داشتند. شبکه‌های تهویه مورد بررسی عموماً با فرض‌هایی ساده‌تر شدند. در مقاله حاضر برای نخستین بار تحلیل شبکه تهویه معدن بدون هیچ گونه محدودیتی به روش گره-حلقه و با بیان ماتریسی ارائه شده است. برای این کار نیاز به معرفی ماتریس نشان دهنده خصوصیات حلقه‌ها بود. این ماتریس توسط نویسندگان معرفی شد.

۳- سیستم معادلات جریان در شبکه‌های تهویه معدن

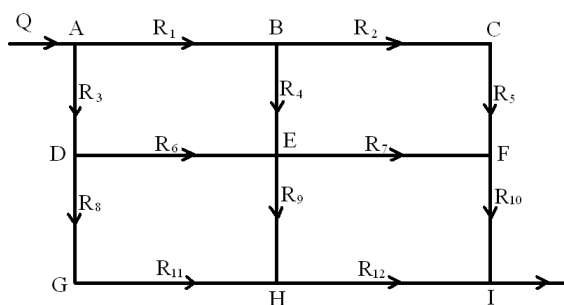
شبکه تهویه در حالت کلی از تعدادی حلقه تشکیل شده است به نحوی که هر حلقه در برگرفته تعدادی شاخه است. شاخه‌ها در محل گره‌ها با یکدیگر تلاقی می‌کنند. هر شاخه نشان دهنده یکی از حفاریات معدنی است که از طرفین به دو تقاطع یا محل برخورد با سایر حفاریات، محدود شده است. در شکل ۱، شبکه تهویه ساده‌ای نشان داده شده است. این شبکه شامل چهار حلقه، ۱۲ شاخه و ۹ گره است. در این حالت شدت جریان Q از گره A وارد شبکه می‌شود. در عمل این گره می‌تواند نشان دهنده انتهای چاه ورود هوا باشد [۱۲]. هدف از تحلیل این شبکه، تعیین پارامترهای زیر است:

(الف) شدت جریان هوا در هر یک از شاخه‌ها

(ب) تعیین جهت جریان در شاخه‌هایی که جهت صحیح جریان از ابتدا در آنها معلوم نیست (مانند شاخه‌های DE, BE, EH, و EF)

(ج) افت فشار کلی شبکه برای تعیین بادبزن اصلی معدن

(د) مقاومت کلی شبکه برای تعیین منحنی مشخصه کلی معدن



شکل ۱: شبکه ساده تهویه

از جمله روش‌های تقریبی تحلیل شبکه، روش گره-حلقه است که روش تئوری خطی و روش وود نیز نامیده می‌شود. این روش ابتدا در تحلیل شبکه‌های توزیع برق و همچنین شبکه‌های آب و فاضلاب به کار گرفته شد ولی در تحلیل شبکه‌های تهویه، اشاره اندکی به آن شده است. روش گره-حلقه، برای اولین بار در حل معادلات جریان شبکه‌های آب در حالت ساده به کار گرفته شد [۱]. سپس با افزودن پمپ و مخزن به شبکه، کاربرد این روش توسعه یافت [۲].

در روش‌های هاردی-کراس و رافسون-نیوتن، نیاز به تخمین اولیه جریان هر شاخه مطابق با قانون گره کرفش است. برخی مواقع خطا در حدس اولیه، به خصوص در شبکه‌های بزرگ، به واگرایی منجر می‌شود. در روش گره-حلقه، به حدس اولیه دبی نیاز نیست. همچنین سرعت همگرایی این روش نسبت به دو روش دیگر نیز بالاتر است [۲]. در مقاله حاضر، کاربرد روش گره-حلقه در حل معادلات شدت جریان هوای شبکه تهویه معرفی شده است.

۲- تاریخچه

در تحلیل سیستم‌های تهویه معدن، روش عددی هاردی-کراس به طور گسترده استفاده می‌شود. این روش ابتدا برای حل مسائل سیستم‌های توزیع آب به کار رفت [۳]. سپس برای تحلیل شبکه‌های تهویه معدن توسعه یافت [۴]. وانگ و هارتمن (۱۹۶۷) برنامه کامپیوتری برای شبکه تهویه معدن با استفاده از روش هاردی-کراس ارائه کردند [۵]. وانگ (۱۹۸۲) کاربرد روش مسیر بحرانی (CPM) را در تهویه معادن برای کنترل جریان هوا در شاخه‌ها به کار برد [۶]. بهامیدپاتی و پروکاریون (۱۹۸۵) کاربرد تئوری خطی در شبکه تهویه را در حالت ساده و بدون تنظیم کننده‌ها و بادبزن با خطی‌سازی معادلات انرژی، نشان دادند [۷]. کامبا و همکاران (۱۹۹۵) امکان به کارگیری روش سیمپلکس را به عنوان یک الگوریتم خطی‌ساز در شبکه تهویه معدن بررسی کردند [۸]. ویی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از تئوری توپولوژی، الگوریتم مسیر را برای شبکه تهویه به کار بردند [۹]. ویی و همکاران (۲۰۱۰) فرآیندی را برای ساده‌سازی شبکه تهویه نشان

1 تعداد حلقه‌های شبکه و C_{oi} عنصر عمومی ماتریس حلقه‌ها است. این ماتریس که توسط رابطه (۵) معرفی شده است، موقعیت شاخه‌های شبکه در هر حلقه را تعیین می‌کند.

$$B = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1i} & \dots & C_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{oi} & \dots & \dots & C_{oi} & \dots & C_{on} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{1l} & \dots & \dots & C_{li} & \dots & C_{ln} \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن:

$C_{oi} = +1$: اگر جهت جریان شاخه i در حلقه 0 نسبت به یک نقطه دلخواه در داخل حلقه، ساعت گرد باشد.
 $C_{oi} = -1$: اگر جهت جریان شاخه i در حلقه 0 نسبت به یک نقطه دلخواه در داخل حلقه، پاد ساعت گرد باشد.
 $C_{oi} = 0$: اگر شاخه i در حلقه 0 نباشد.

روابط (۱)، (۲) و (۴)، دستگاه معادلات تحلیل شبکه را تشکیل می‌دهند. عموماً حل این دستگاه با کمک روش‌های تقریبی صورت می‌گیرد. از جمله این روش‌ها، تئوری خطی است. در ادامه مبانی و چگونگی استفاده از این روش در تحلیل شبکه‌های تهویه ارائه می‌شود.

۴- مبانی ریاضی روش گره- حلقه

یکی از روش‌های حل معادلات جبری و معادلات دیفرانسیل غیرخطی، تبدیل آنها به معادلات خطی مطابق رابطه (۶) است [۱۶].

$$\beta^k \psi^k = \beta_0^k \psi_0^k + \beta_0 (\psi^{k+1} - \psi_0^k) + \psi_0 (\beta^{k+1} - \beta_0^k) \quad (6)$$

در الگوریتم حل این روش، تابع مورد استفاده به قانون توان بستگی دارد. این تابع شدت جریان شاخه‌ها را در تکرارهای متوالی و با سرعت همگرایی بالا تعدیل می‌کند، که نسبت به روش‌های هاردی- کراس و نیوتن- رافسون از مزایای آن محسوب می‌شود [۲]. در روش گره- حلقه، مطابق رابطه (۷)، n معادله غیر خطی افت فشار شاخه‌های شبکه، به معادله‌های خطی تبدیل می‌شوند [۱۷].

$$\Delta P_i = [R_i Q_{i0}^{2-1}] Q_i = [R_i Q_{i0}] Q_i = R_i^* Q_i \quad (7)$$

که در آن Q_{i0} شدت جریان تخمینی اولیه در شاخه i است.

به منظور تعیین این پارامترها، معادلات هیدرولیکی زیر به کار گرفته می‌شود [۱۳]:

الف) برای هر یک از شاخه‌ها رابطه (۱) برقرار است.

$$\Delta P_i = R_i Q_i^2 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

که در آن: n تعداد شاخه‌های شبکه، i شماره شاخه، R_i مقاومت شاخه، Q_i شدت جریان عبوری از شاخه، و ΔP_i افت فشار ناشی از حرکت هوا در شاخه است.

ب) برای هر گره در شبکه، اصل پیوستگی جریان مطابق رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$\sum_{i=1}^n a_{ki} Q_i = 0 \quad (k=1,2,\dots,j-1) \quad (2)$$

j تعداد گره‌های شبکه است و لذا $j-1$ گره‌های مستقل وجود دارد.

به منظور نشان دادن موقعیت گره‌ها در شبکه، از رابطه (۳) استفاده می‌شود. A ماتریس گره نامیده می‌شود. این ماتریس برای مشخص کردن موقعیت شاخه‌ها و گره‌های شبکه نسبت به یکدیگر به کار می‌رود [۱۴]. a_{ki} عنصر عمومی ماتریس است.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & \dots & \dots & a_{ki} & \dots & a_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{(j-1)1} & \dots & \dots & a_{(j-1)i} & \dots & a_{(j-1)n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن:

n - تعداد شاخه‌های شبکه

j - تعداد گره‌های شبکه

$a_{ki} = +1$: شاخه i به گره k وارد شود.

$a_{ki} = -1$: شاخه i از گره k خارج شود.

$a_{ki} = 0$: شاخه i با گره k تلاقی نداشته باشد.

در صورتی که در تحلیل شبکه تهویه، جریان شاخه‌ها به عنوان مجهولات در نظر گرفته شوند، روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شوند. اگر مجهولات شبکه، ارتفاع نظیر فشار در محل‌های تقاطع یا گره در نظر گرفته شوند، روابط برحسب فشار گره‌ها تنظیم می‌شوند [۱۵].

ج) در هر حلقه، اصل بقای انرژی مطابق رابطه (۴) بیان می‌شود [۱۳].

$$\sum_{i=1}^n C_{oi} \Delta P_i = 0 \quad (o=1,2,\dots,l) \quad (4)$$

۵- تعمیم روش گره- حلقه به شبکه‌های شامل بادبزن و تهویه طبیعی

در مواردی که شدت جریان در چاه‌ها و یا تونل‌های ورود و خروج هوا از معدن ثابت باشد، دستگاه معادلات تعیین دبی در شاخه‌ها مطابق روابط (۲) و (۴) است. در این حالت چاه یا تونل‌های ورود و خروج اصلی هوا، شاخه‌های با دبی مجهول در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه این شاخه‌ها از شبکه حذف شده و تنها مقدار دبی ثابت آنها در معادله پیوستگی گره‌ها، در نظر گرفته می‌شود. در عمل در شبکه‌های تهویه معدن، به مولدهای انرژی برای برقراری جریان هوا نیاز است. این انرژی توسط موارد زیر تامین می‌شود:

(الف) بادبزن یا بادبزن‌های اصلی معدن که در محل دهانه چاه‌ها یا تونل‌های اصلی نصب می‌شوند.

(ب) بادبزن‌های فرعی یا بوسترها که برای تقویت انرژی هوا در مسیرهای طولانی و پر مقاومت و یا تهویه بن‌بست‌ها استفاده می‌گردند.

(ج) تهویه طبیعی که ناشی از اختلاف دما در دهانه‌های ورودی و خروجی معدن بوده و ممکن است در جهت تهویه مکانیکی ناشی از بادبزن، و یا در جهت خلاف آن باشد.

از بین موارد بالا، عمومیت با مورد یک است. در این صورت شدت جریان در چاه یا تونل شامل بادبزن نیز مجهول است. بدین ترتیب تعداد مجهولات شبکه افزایش می‌یابد.

با افزوده شدن چاه یا تونل اصلی به شاخه‌های شبکه (مانند شکل ۲) حلقه جدیدی به شبکه افزوده می‌شود. این حلقه شامل چاه‌ها و تونل‌های اصلی، تعدادی از شاخه‌ها و شاخه مجازی است. شاخه مجازی شاخه‌های اصلی ورود و خروج هوا را در سطح زمین به هم وصل می‌کند. مقدار جریان شاخه‌ها و همچنین توزیع فشار توسط قرارگیری مناسب بادبزن، درب‌ها و تنظیم کننده‌ها، کنترل می‌شود [۱۹].

حلقه جدید که شامل شاخه مجازی است، حلقه مجازی نامیده می‌شود. معادله انرژی این حلقه مطابق رابطه ۱۲ به معادلات حلقه‌ها اضافه می‌شود.

$$\sum_{i=1}^n C_{oi} R_i Q_i^2 - \sum_{i=1}^n C_{oi} P_{Fi} \pm P_n = 0 \quad (o = 1, 2, \dots, 1) \quad (12)$$

با تلفیق روابط (۴) و (۷)، اصل بقای انرژی در هر حلقه مطابق رابطه (۸) می‌شود.

$$\sum_{i=1}^n C_{oi} R_i^* Q_i = 0 \quad (o = 1, 2, \dots, 1) \quad (8)$$

با توجه به رابطه (۹)، معادله‌های خطی حلقه‌ها همراه با معادله‌های خطی پیوستگی گره‌های شبکه، که تعداد آنها $1-j$ است، برای تعیین دبی شاخه‌ها کفایت می‌کنند [۱۸].

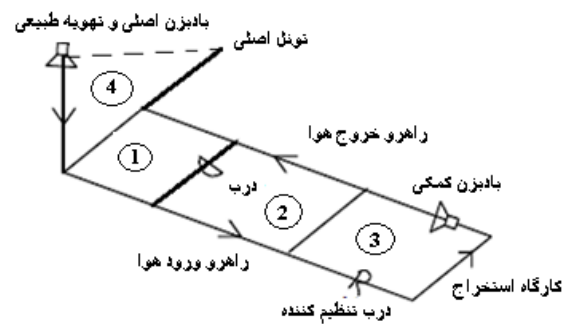
$$1 + \text{تعداد گره‌ها} - \text{تعداد شاخه‌ها} = \text{تعداد حلقه‌ها} \quad (9)$$

در این حالت یک دستگاه n معادله، n مجهولی ایجاد خواهد شد که حل آن به راحتی امکان پذیر است. پیشنهاد می‌شود، به منظور خطی کردن معادلات انرژی حلقه‌ها، اولین حدس Q_{i0} برابر میانگین جواب‌های نهایی احتمالی در نظر گرفته شود. اگر حدس اولیه، که برای کلیه شاخه‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود، با میانگین جواب نهایی تفاوت فاحش داشته باشد، امکان واگرایی وجود خواهد داشت. امکان وقوع این وضعیت، به ویژه زمانی که در شبکه بادبزن تقویتی استفاده می‌شود، زیاد است [۲]. در روش‌های هاردی-کراس و نیوتن-رافسون، در شروع حل، برای شدت جریان هر یک از شاخه‌ها، مقدارهای تخمینی جداگانه‌ای در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر در معادله‌های پیوستگی گره‌های شبکه صدق می‌کند. در صورتی که در روش گره-حلقه، تخمین جداگانه انجام نمی‌شود، بلکه بدون توجه به معادله‌های گره‌ها، مطابق رابطه (۱۰)، شدت جریان یکسانی برای تمام شاخه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

$$Q_{i0} = \text{cte.} \quad (10)$$

با حل دستگاه خطی n معادله n مجهولی، شدت جریان شاخه‌ها در تکرار اول (Q_{i1}) تعیین می‌شوند. سپس بر اساس Q_{i1} ، ضرایب R_{i1}^* از رابطه $R_{i1}^* = R_i Q_{i1}$ به دست می‌آیند تا در دومین تکرار حل دستگاه خطی، به عنوان ضرایب Q_i در معادله‌های حلقه‌ها لحاظ شوند. به همین نحو در تکرار t ام ضرایب $R_{i(t-1)}^* = R_i Q_{i(t-1)}$ استفاده می‌شود. تجربه نشان داده است که اگر متوسط جواب‌های حاصل از دو تکرار قبلی، مطابق رابطه (۱۱)، برای هر یک از شاخه‌ها به کار برده شوند، از نوسان در اطراف جواب‌های واقعی جلوگیری می‌شود [۱۷].

$$Q_{it} = \frac{Q_{i(t-1)} + Q_{i(t-2)}}{2} \quad (11)$$



شکل ۲: شاخه مجازی با خط چین نشان داده شده است. حلقه ۴ یک حلقه مجازی است

(۱۴) سبب می‌شود تقارب به سوی جواب صحیح به آهستگی انجام گیرد و حتی ممکن است واگرایی ایجاد شود. برای اصلاح این وضعیت، در رابطه (۱۲) به جای P_F تغییر متغیر به کار می‌رود، به گونه‌ای که معادله متغیر جدید مشابه معادله افت فشار شاخه‌ها، معادله درجه ۲ ناقص باشد. این تبدیل طبق رابطه (۱۵) تعریف می‌شود.

$$G_i = Q_i - \frac{a}{2c} \quad (15)$$

که در آن، G_i متغیر جدید، a و c ضرایب ثابت معادله منحنی مشخصه بادبزن در رابطه (۱۴) هستند. با تلفیق روابط (۱۴) و (۱۵)، رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$P_{Fi} = a \left(G_i + \frac{a}{2c} \right) + b - c \left(G_i + \frac{a}{2c} \right)^2 \quad (16)$$

پس از ساده کردن، رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$P_{Fi} = -cG_i^2 + P_0 \quad (17)$$

که در آن P_0 طبق رابطه (۱۸) تعریف می‌شود.

$$P_0 = b + \frac{a^2}{4c} \quad (18)$$

با تلفیق روابط (۱۲) و (۱۸)، رابطه (۱۹) به دست می‌آید که در آن کلیه مجهول‌ها توان ۲ دارند.

$$\sum_{i=1}^n C_{oi} R_i Q_i^2 - \sum_{i=1}^n C_{oi} (cG_i^2 + P_0) \quad (19)$$

$$\pm P_n = 0 (o = 1, 2, \dots, 1)$$

برای خطی کردن عبارت cG_i^2 ، از رابطه (۲۰) که مشابه رابطه (۷) است، استفاده می‌شود.

$$cG_i^2 = cG_{i0}G_i = K_i G_i \quad (20)$$

ضریب K_i مشابه ضریب R_i^* در رابطه (۷) است. در این حالت، با استفاده از روش گره- حلقه، سیستم روابط شبکه به سرعت به جواب نزدیک خواهد شد [۱۷].

۶- مراحل تشکیل و حل معادلات شبکه به کمک روش گره- حلقه

در حالت کلی که شبکه شامل بادبزن یا بادبزن‌هایی در شاخه‌های مختلف است، مراحل زیر برای انجام محاسبات صورت می‌گیرد:

الف) معادله‌های پیوستگی گره‌هایی که به سطح زمین راه ندارند، تشکیل داده می‌شوند.

ب) معادله‌های افت فشار حلقه‌هایی که فاقد شاخه مجازی هستند، تشکیل داده می‌شوند.

رابطه (۱۲)، نشان دهنده افت انرژی در حلقه مجازی است. در این رابطه P_n فشار ناشی از تهویه طبیعی است که اگر به افزایش جریان در جهت ساعت‌گرد حلقه کمک کند، با علامت منفی و در غیر این صورت، با علامت مثبت در نظر گرفته می‌شود. مقدار فشار تهویه طبیعی در زمان ثابت بوده و بستگی به جریان شاخه‌ها ندارد. فشار ناشی از بادبزن در شاخه i است که مقدار آن بر حسب رابطه (۱۳) که معادله منحنی مشخصه بادبزن نامیده می‌شود، به دست می‌آید.

$$P_{Fi} = f(Q_i) \quad (13)$$

بادبزن‌های اصلی معدن اکثراً از نوع شعاعی هستند و در ابتدای معدن نصب می‌شوند، لذا حلقه شامل بادبزن اصلی معمولاً مجازی است. بادبزن‌های تقویتی در داخل شاخه‌های معدن نصب می‌شوند و معمولاً از نوع محوری هستند [۲۰]. حلقه شامل بادبزن تقویتی می‌تواند حقیقی یا مجازی باشد. معادله منحنی مشخصه هر بادبزن توسط کارخانه سازنده داده می‌شود. این روابط معمولاً مطابق رابطه (۱۴)، به صورت رابطه درجه دوم هستند [۱۳].

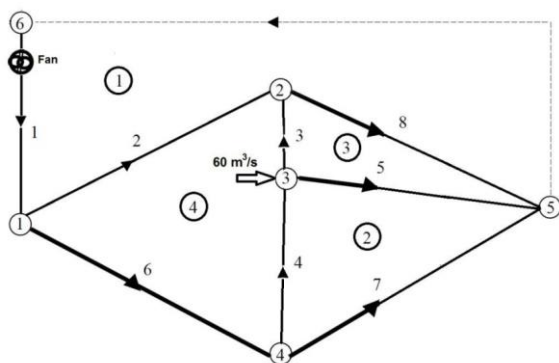
$$P_{Fi} = aQ_i + b - cQ_i^2 \quad (14)$$

برای یک بادبزن مشخص، ضرایب a ، b و c مقادیری معلوم هستند. با تلفیق روابط (۱۲) و (۱۳)، یک رابطه غیر خطی به دست می‌آید که فقط شامل جریان‌های مجهول شاخه‌ها است. در این حالت نمی‌توان با استفاده از روش گره- حلقه، همانند حالتی که در شبکه بادبزن یا تهویه طبیعی وجود ندارد، به جواب نزدیک شد. به طور کلی می‌توان گفت، وجود بادبزن در شبکه باعث افزایش تکرار در روش گره- حلقه، به منظور دستیابی به پاسخ می‌شود [۲].

در این شرایط برای استفاده از روش گره- حلقه، تغییراتی در معادله بادبزن داده می‌شود. توان ۲ در رابطه

دهشی و از طریق بادبزی که در چاه ورودی شماره ۱ نصب شده است، انجام می‌گیرد. شدت جریان هوا در ورودی گره ۳ ثابت است. این جریان می‌تواند ناشی از تهویه طبیعی و یا هر گونه جریان ثابت بیرون شبکه‌ای ناشی از شبکه‌های دیگر باشد که در این مثال به منظور لحاظ کردن انواع مختلف منابع انرژی آورده شده است. فشار تهویه طبیعی بستگی به اختلاف فشار هوا در ورودی و خروجی معدن دارد. فشار هوا در این نقاط تابع دما بوده و مستقل از مقاومت درون شبکه است که با توجه به مقاومت معدن، سبب جریان ثابتی می‌شود. مقاومت شاخه‌ها بر حسب کیلومورگ در جدول ۱ درج شده است. معادله منحنی مشخصه بادبزن به صورت رابطه (۲۲) است [۲۲].

$$P_{F1} = 8.53Q_1 + 114.09 - 0.21Q_1^2 \quad (22)$$



شکل ۳: شبکه تهویه معدن و موقعیت حلقه‌ها و گره‌ها

جدول ۱: مقاومت شاخه‌ها بر حسب کیلو مورگ

شماره شاخه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
مقاومت (کیلومورگ)	۰/۱۰	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۷

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \\ Q_7 \\ Q_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 60 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Loops Equations: Loops matrix} \times \Delta P \text{ matrix} = 0$$

ج) حلقه‌های مجازی، با رسم خطوط خط چین واصل بین گره‌های سطح زمین (دهانه چاه‌ها یا تونل‌ها)، ایجاد می‌شوند. این خطوط نشان‌دهنده شاخه‌های مجازی با شدت جریان صفر هستند. تعداد حلقه‌های مجازی باید برابر با اختلاف بین تعداد جریان‌های مجهول شاخه‌ها و مجموع تعداد حلقه‌های غیر مجازی و گره‌ها باشد [۱۸].

د) به ازای هر بادبزن موجود در شبکه، روابطی طبق رابطه (۱۵) نوشته می‌شوند.

ه) با تعیین ضرایب R_i^* و K_i با استفاده از روابط (۷) و (۲۰)، روابط افت فشار حلقه‌ها، خطی می‌شوند.

و) دستگاه معادله‌های خطی حل شده و عملیات تکرار می‌شود تا جواب مورد نظر حاصل شود. همانطور که قبلاً اشاره شد، بعد از تکرار دوم به کمک رابطه (۱۱)، ضرایب K_i و R_i^* تعیین می‌شوند.

ز) هرگاه خطای دبی به دست آمده از هر مرحله نسبت به مرحله قبل در رابطه (۲۱) صدق کند، عملیات متوقف می‌شود و آخرین دبی شاخه‌ها، جواب مسئله است [۲۱]. مقدار حداقل خطای اختیاری است.

$$\varepsilon = \frac{\sum |Q_i - Q_{i-1}|}{\sum Q_{i-1}} \leq 0.005 \quad (21)$$

۷- مثال عددی

شبکه تهویه شکل ۳ شامل دو ورودی هوای چاه ۱ و گره ۳ و سه خروجی هوای ۵، ۷، ۸ است. تهویه به روش

حل: در شبکه تهویه، ۸ شاخه با شدت جریان مجهول وجود دارد. همچنین متغیر G_1 مربوط به بادبزن شاخه ۱ نیز مجهول است. چهار معادله با تشکیل معادلات پیوستگی گره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به دست می‌آید. چهار معادله نیز از سه حلقه حقیقی ۲، ۳، ۴ و حلقه مجازی ۱ حاصل می‌شود. معادله نهم با استفاده از رابطه (۱۵) تعیین می‌شود. بنابراین ماتریس گره‌ها و حلقه‌های این شبکه به صورت زیر خواهد شد:

$$\text{Nodes Equations: Nodes matrix} \times Q \text{ matrix} = \text{Constants values matrix}$$

$$\text{loop1} : -(Q_{10})Q_1 - (2Q_{20})Q_2 - (1.7Q_{80})Q_8 + (2.16G_{10})G_1 + 200.71 = 0$$

$$\text{loop2} : (1.8Q_{40})Q_4 + (0.8Q_{50})Q_5 - (1.5Q_{70})Q_7 = 0$$

$$\text{loop3} : (2.2Q_{30})Q_3 - (0.8Q_{50})Q_5 + (1.7Q_{80})Q_8 = 0$$

$$\text{loop4} : (2Q_{20})Q_2 - (2.2Q_{30})Q_3 - (1.8Q_{40})Q_4 - (Q_{60})Q_6 = 0$$

در تکرار اول بدون توجه به معادلات گره‌ها، مقدار یکسانی برای دبی‌ها در نظر می‌شود. براساس جریان ورودی به گره ۳، میزان ۲۰ مترمکعب بر ثانیه برای $Q_{10}, Q_{20}, \dots, Q_{80}$ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به رابطه (۱۵)، G_{10} نیز بدست می‌آید. بنابراین دستگاه معادلات خطی با ۹ معادله و ۹ مجهول ایجاد می‌شود. ماتریس ضرایب این دستگاه برای تکرار اول خواهد شد:

node 1	-1	1	0	0	0	1	0	0	0
node 2	0	-1	-1	0	0	0	0	1	0
node 3	0	0	1	-1	1	0	0	0	0
node 4	0	0	0	1	0	-1	1	0	0
loop 1	-30	-40	0	0	0	0	0	-34	-0.67
loop 2	0	0	0	36	16	0	-30	0	0
loop 3	0	0	44	0	-16	0	0	34	0
loop 4	0	40	-44	-36	0	-20	0	0	0
fan 1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1

پس از حل دستگاه و تعیین دبی جدید شاخه‌ها، عناصر ماتریس ضرایب جدید به وسیله رابطه (۱۱) به دست می‌آید. پس از چند مرحله تکرار، جواب نهایی مطابق جدول ۲ تعیین می‌شود.

جدول ۲: جواب نهایی مثال به روش گره-حلقه

شماره شاخه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
دبی (m^3/s)	۲۶/۷۸	۱۲/۰۱	۱۱/۰۷	-۱۰/۶۰	۳۸/۳۳	۱۴/۸۶	۲۵/۴۷	۲۳/۰۸

آن $d_2-d_3-d_4-d_5-d_6$ از زون زغالی d با شیب ۱۰ تا ۶۰ درجه و با ضخامت تا ۲/۵۰ متر است. در حال حاضر با ۱۳ کارگاه فعال از پایین‌ترین افق کاری ۲۳۸۰+ تا سطح زمین در قالب ۵ افق کاری به استخراج زغال می‌پردازد. روش استخراج در این معدن جبهه کار طولانی است [۲۳]. میزان گازخیزی در حد وسیعی تغییر می‌کند به طوری که در عمق ۲۵۵ متری به ازای هر تن زغال استخراجی، ۲ مترمکعب و در عمق ۵۰۰ متری ۷/۷ مترمکعب است.

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_1 - P_{f_1} \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta P_6 \\ \Delta P_7 \\ \Delta P_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

در شاخه‌های شامل بادبزن، فشار ایجاد شده توسط بادبزن با علامت خلاف افت انرژی به ΔP شاخه جمع بسته می‌شود. پس از ضرب ماتریس‌ها، دستگاه معادلات زیر به دست می‌آید که با معادله فن شامل ۹ معادله می‌شود.

$$\text{node 1} : -Q_1 + Q_2 + Q_6 = 0$$

$$\text{node 2} : -Q_2 - Q_3 + Q_8 = 0$$

$$\text{node 3} : -Q_4 + Q_3 + Q_5 = 60$$

$$\text{node 4} : -Q_6 + Q_4 + Q_7 = 0$$

$$\text{loop 1} : -R_1 Q_1^2 - R_2 Q_2^2 - R_8 Q_8^2 + (cG_1^2 + P_0) = 0$$

$$\text{loop 2} : R_4 Q_4^2 + R_5 Q_5^2 - R_7 Q_7^2 = 0$$

$$\text{loop 3} : R_3 Q_3^2 - R_5 Q_5^2 + R_8 Q_8^2 = 0$$

$$\text{loop 4} : R_2 Q_2^2 - R_3 Q_3^2 - R_4 Q_4^2 - R_6 Q_6^2 = 0$$

$$G_1 - Q_1 = \frac{8.53}{2(-0.21)} = -20.31$$

همچنین مقدار P_0 با توجه به رابطه (۱۹) برابر است با:

$$P_0 = b + \frac{a^2}{4c} = 114.09 + \frac{(8.53)^2}{4(0.21)} = 200.71$$

با قرار دادن مقادیر عددی در معادله‌های انرژی حلقه‌ها و خطی‌سازی آنها، مطابق روابط (۷) و (۲۰) خواهد شد:

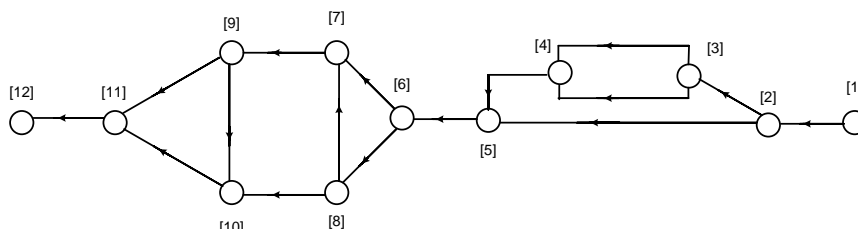
فشار تامین شده توسط فن نیز با توجه به رابطه (۲۲) برابر ۱۹۱/۹۲ میلی مترآب می‌شود.

۸- مطالعه موردی

اجرای روش گره-حلقه بر روی شبکه تهویه معدن زغالسنگ پابدانا انجام شد. این معدن در فاصله ۱۳۰ کیلومتری شمال غرب کرمان واقع است. ذخیره فعلی معدن قریب ۱ میلیون تن زغال کک‌شو بوده و لایه‌های قابل کار

نتایج اجرای روش گره-حلقه برای این شبکه در جدول ۳ آورده شده است [۲۴]. برای تامین انرژی، از بادبزن‌های موجود استفاده شد. در این حالت فشار لازم که هر بادبزن ایجاد می‌کند، مطابق جدول ۴ است.

شکل ۴ شبکه ساده شده تهویه معدن زغالسنگ پابدانا را نشان می‌دهد. در این شکل ۱۶ شاخه و ۱۲ گره وجود دارد. در شاخه‌های (۹،۱۰)، (۸،۱۰)، (۶،۸) و (۲،۳) بادبزن قرار دارد و در شاخه‌های (۹،۱۱)، (۶،۷) و (۲،۵) درب تنظیم کننده هوا قرار گرفته است [۲۴].



شکل ۴: شبکه ساده شده تهویه معدن زغال سنگ پابدانا

جدول ۳: اطلاعات مربوط به شبکه تهویه معدن زغال سنگ پابدانا

شماره شاخه	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۳-۴	۲-۵	۴-۵	۵-۶	۶-۷
مقاومت ($N.s^2/m^8$)	۱/۰۳	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۸۴	۲/۹۰	۰/۹۹	۱/۷۰	۳/۴۰
دبی (m^3/s)	۸/۴۳	۵/۸۳	۲/۸۱	۳/۰۲	۲/۶۰	۵/۸۳	۸/۴۳	۳/۷۸
شماره شاخه	۶-۸	۸-۷	۷-۹	۸-۱۰	۹-۱۰	۹-۱۱	۱۰-۱۱	۱۱-۱۲
مقاومت ($N.s^2/m^8$)	۲/۵۶	۴/۷۶	۲/۱۴	۲/۵۸	۱/۲۱	۲/۷۰	۳/۲۵	۲/۱۴
دبی (m^3/s)	۴/۶۵	۱/۰۵	۴/۸۳	۳/۶۰	۳/۸۷	۰/۹۶	۷/۴۷	۸/۴۳

جدول ۴: فشار بادبزن‌های شبکه

شاخه محل نصب	۲-۳	۶-۸	۸-۱۰	۹-۱۰
فشار هر بادبزن (Pa)	۴۴۵/۵۰	۳۰/۷۷	۲۶۳/۷۰	۴۶۹/۲۰

ماتریسی فراهم می‌شود که می‌تواند مبنای برنامه نویسی‌های بسیار ساده برای تحلیل شبکه قرار گیرد. روش گره-حلقه برای شبکه تهویه معدن زغالسنگ پابدانا به کار گرفته شد و همگرایی آن در عمل به خوبی نشان داده شد.

مراجع

- [1] Wood, D. J., Charles, C. O. A. (1972). Hydraulic network analysis using linear theory. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 98(HY7), 1157-1170.
- [2] Jeppson, R. W., Tavallae, A. (1975) Pumps and reservoirs in networks by linear theory. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 101(HY3), 576-580.
- [3] Cross, H. (1936). Analysis of flow in networks of conduits or conductors. Bulletin 286, Engineering

۹- نتیجه‌گیری

پیچیدگی و تعداد زیاد متغیرها و معادلات شبکه‌های تهویه معدن، لزوم استفاده از روش‌های تقریبی را نشان می‌دهد. در روش‌های هاردی-کراس و نیوتن-رافسون، نیاز به حدس بر اساس معادلات پیوستگی گره‌ها است که برای شبکه‌های بزرگ، مشکل و وقت‌گیر است. در روش گره-حلقه نیازی به در نظر گرفتن معادله‌های گره‌ها نیست. همچنین، مزیت دیگر این روش سرعت بالای همگرایی برای معادلات توانی مرتبه ۲ است؛ لذا، استفاده از آن برای تحلیل شبکه‌ها مناسب‌تر است. در صورتی که وضعیت شبکه توسط ماتریس‌های گره و حلقه بیان شود، نیازی به نوشتن معادله‌ها نخواهد بود و امکان استفاده از روش‌های

- Journal of Mining Engineering, 3(5): 71-77 (In Persian).
- [16] Phillips, G. M., Taylor, P. J. (1980). Theory and Applications of Numerical Analysis. Academic Press.
- [17] Ellis, D. J., Simpson, A. R. (1996). Convergence of Iterative Solvers for the Simulation of a Water Distribution Pipe Network. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Adelaide, Research Report No. R138.
- [18] Jeppson, R. W. (1974). Steady Flow Analysis of Pipe Networks. An Instructional Manual, Utah State University.
- [19] Lowndes, I. S., Fogarty, T., Yang, Z. Y. (2004). The application of genetic algorithms to optimize the performance of a mine ventilation network: the influence of coding method and population size. Springer-Verlag.
- [20] Hartman, H. L. (1982) Mine Ventilation and Air conditioning. John Wiley & Sons Inc.
- [21] Savic, D. A., Walters, G. A. (1994). An Evolution Program for Pressure Regulation in Water Distribution Networks. Report Number: 94/15, University of Exeter, United Kingdom.
- [22] Madani, H. (2003). Mine Ventilation. Vol. 2, Amirkabir Uni. Pub, Tehran, Iran (In Persian).
- [23] <http://coal.kr.ir/pabdana.aspx>
- [24] Hajighorbani, A. (2013). Application of operational research network models in mine ventilation (case study: coal mine of Pabdana. M.Sc. thesis, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran (In Persian).
- Experiment Station, University of Illinois, Urbane, 29 pp.
- [4] Scott, D. R., and Hinsley, F. B. (1951). Ventilation network theory. Colliery Engineering, London, 28(334), 497-500.
- [5] Wang, Y. J., Hartman, H. L. (1967). Computer solution of three-dimensional mine ventilation networks with multiple fans and natural ventilation. Int. J. Rock Mech. Eng. Sci., Oxford, Vol. 4, 129-154.
- [6] Wang, Y. J. (1982). Critical path approach to mine ventilation networks with controlled flow. Trans. SME-AIME, Vol. 272, 1862-72.
- [7] Bhamidipati, S. S., Procarione, J. A. (1985). Linear analysis for the solution of flow distribution problems. Proceedings of the 2th US Mine Ventilation Symposium.
- [8] Kamba, G. M., Jacques, E., Patigny, J. (1995). Application of the simplex method to the optimal adjustment of the parameters of a ventilation network. Proceedings of the 7th US Mine ventilation Symposium.
- [9] Wei, L. J., Zhou, F. B., Zhu, H. X. (2008). Topology theory of ventilation network and path algorithm. Journal of China Coal Society, 33(9): 926-930.
- [10] Wei, L. J., Wang, Y. J., Fang, Z. W. (2010). Theory and process to simplify complicated ventilation networks. Journal of China university of mining and technology, 39(4): 480-483.
- [11] Jia, T. G., Wang, Sh. G., Qu, G. N. (2013). Research on the adjustment model of ventilation characteristic parameters based on integrated method of circuit and path. Journal of Coal Science and Engineering, China, 19(1): 33-37.
- [12] Madani, H. and Maleki, B. (2007). "Mine ventilation network analysis by Newton – Raphson method based on the equations of ΔQ ." Journal of Amirkabir Uni., 3(66) (In Persian).
- [13] McPherson, M. J. (1993). Subsurface Ventilation and Environmental Engineering. Chapman & Hall, UK, P.136.
- [14] Yun, Q. X., Huang, K. M. (2000). Determination of Ventilation System for Mines by Genetic Algorithm. Environmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production.
- [15] Madani, H., Maleki, B. (2008). "Mine ventilation network analysis by Newton – Raphson method based on the equations of H." Iranian

THIS PAGE IS INTENTIONALLY LEFT BLANK