

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری استخراج مواد معدنی

ارائه یک مدل ریاضی برای تحلیل شبکه تهویه معادن

نگارنده

ابراهیم الهی زینی

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر رضا کاکایی

آبان ۱۳۹۹

شماره: ۹۹۹۹۹۹۹۹-۲۰۰۵
تاریخ: ۹۹-۹-۱۶
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای ابراهیم الهی زینی دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن گرایش استخراج به شماره دانشجویی ۹۳۰۰۱۶۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۳ در تاریخ ۹۹/۸/۶ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: ارائه یک مدل ریاضی برای تحلیل شبکه تهویه معادن دفاع و با اخذ نمره ۱۷/۷۵ به درجه ... نائل گردید.

جدول تعیین درجه نمره رساله برای ورودیه‌های ۹۴ و ماقبل

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	☐ د) مردود: کمتر از ۱۵

جدول تعیین درجه نمره رساله برای ورودیه‌های ۹۵ و مابعد

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶	☐ د) مردود: کمتر از ۱۶

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر فرهنگ سرشکی	استاد راهنما	استاد	
۲	دکتر رضا کاکایی	استاد راهنما	استاد	
۳	دکتر محمد جواد جعفری	استاد مدعو خارجی	استاد	
۴	دکتر محمد عطایی	استاد مدعو داخلی	استاد	
۵	دکتر ابراهیم هاشمی	استاد مدعو خارجی	استاد	
۶	دکتر امین روشندل کاهو	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای ابراهیم الهی زینی بعمل آید.



تقدیم اثر

تقدیم به

ارواح پدر و مادر عزیزم،

همسرفداکارم

و دو فرزند دلبندم

تشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران خداوند منان را که طاعتش موجب قربت است و به شکراندرش مزید نعمت. از زحمات اساتید بزرگوار جناب دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر رضا کاکایی برای راهنمایی‌های ارزنده‌شان کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از زحمت داوران محترم این رساله نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم.

خداوند عزوجل را بسی شاکرم که بر من منت نهاد تا در سایه‌ی پدر و مادری مهربان مسیر علم و زندگی را طی کنم. ازمسرم که وجودش برای من همه عشق است و وجودم برای او همه رنج، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب ابراهیم الهی زینی دانشجوی دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رسالهٔ ارائه یک مدل ریاضی برای تحلیل شبکه تهویه معادن تحت راهنمایی دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر رضا کاکائی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام ((دانشگاه صنعتی شاهرود)) و یا ((Shahrood University of Technology)) به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل این رساله، در مواردی که موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۹/۷/۱

امضای دانشجو: ابراهیم الهی زینی

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، متاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب به نحو مقتضی در تولیدات مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

طرح تهویه برای فضاهای زیرزمینی همچون معدن امری ضروری است. برای طراحی تهویه معادن چندین دیدگاه از نظر تحلیل سیالاتی و روش طراحی وجود دارد. طراحی تهویه از نظر تحلیل سیالاتی، در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری تحلیل می‌شود که از نظر روش طراحی در دو روش دستی و رایانه‌ای ارائه شده است.

یکی از روش‌های طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری استفاده از روش رایانه‌ای است که این روش برپایه روش‌های تقریبی ریاضی استوار است. بر این اساس در این رساله تعدادی از روش‌های تقریبی ریاضی در چهار هدف مختلف همچون تعداد تکرار محاسبات ریاضی، زمان انجام محاسبات ریاضی، همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی و سهولت کاربرد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به محدودیت‌های هر یک از روش‌های مطرح شده مفاهیم جدیدی از شاخه‌های مشترک و غیرمشترک، حلقه مستقل و عدم استفاده از مشتقات متوالی تعریف شد و بر این اساس سه روش جدید با نام‌های دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس، روش نیوتن-رافسون بدون مشتق و روش‌های اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس ارائه شدند. طبق نتایج حاصل شده از آخرین مطالعه موردی انجام شده بیانگر این مطلب است که اکثر روش‌های هاردی کراس و روش نیوتن-رافسون مدل ونگ در این مطالعه موردی واگرا شده و تعداد تکرار محاسبات ریاضی و زمان انجام محاسبات آن به سمت بی‌نهایت میل کرده ولی دو روش نیوتن-رافسون بدون مشتق و دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس با حداکثر زمان ۰/۰۱۶ ثانیه به عنوان سریع‌ترین روش‌های تقریبی ریاضی از نظر زمان انجام محاسبات ریاضی، سهولت کاربرد و همگرایی به جواب نهایی براساس دقت محاسبات ریاضی در این مطالعه موردی مطرح می‌شوند.

از دیگر روش‌های طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌پذیری استفاده از معادلات ترمودینامیکی برای تحلیل هوای مرطوب است که نیاز به حل دو معادله غیرخطی است. تحلیل مدل هوای مرطوب با استفاده از روش نیوتن-رافسون و سایر روش‌هایی که برپایه مشتق استوار هستند سبب حجیم شدن معادلات نهایی به همراه طولانی شدن زمان انجام محاسبات ریاضی می‌شوند. بر این اساس برای سهولت حل این دو معادله غیرخطی و همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی براساس دقت محاسبات ریاضی، سه روش جدید با نام‌های روش دلتا (Δ)، روش K و روش K-W برای طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌پذیری ارائه شده‌اند. علاوه بر سهولت حل معادلات ترمودینامیکی توسط روش‌های فوق، روش K-W قادر است مقدار رطوبت خروجی هوا را بدون معلوم بودن مقدار تبخیر بخار آب در طول حفاری محاسبه نماید. همچنین مقدار قدر مطلق حداکثر خطای حاصل از روش‌های جدید با روش‌های قدیم براساس مطالعات انجام شده برابر ۰/۰۲۵ که معادل ۲/۵ درصد است.

در پایان برای کاهش خطا و افزایش دقت انجام محاسبات ریاضی یک برنامه رایانه‌ای تحت ویندوز با عنوان "Ventilation Design" در محیط برنامه نویسی Visual C++ 6 ارائه شده است. این برنامه رایانه‌ای از نظر کدنویسی از حافظه پویا بهره برده و با توجه به قابلیت سخت‌افزاری رایانه می‌تواند شبکه‌های مختلف تهویه را با حجم‌های مختلف مورد تحلیل قرار دهد. اعتبارسنجی‌های مختلفی که از این برنامه رایانه‌ای در مدل‌های مختلف انجام شد و نتایج خروجی حاصل شده از این برنامه رایانه‌ای مورد اطمینان می‌باشد.

کلیدواژه: تهویه، تراکم‌ناپذیری، تراکم‌پذیری، هاردی کراس و نیوتن-رافسون

لیست مقالات مستخرج از رساله

مقالات ارائه شده در مجلات ISI، علمی و پژوهشی، بین‌المللی، ...				
ردیف	مقاله	مجله	نوع مقاله	وضعیت
۱	مدل پیشنهادی برای اصلاح روش نیوتن-رافسون در تحلیل شبکه های تهویه DOI: 10.30479/jmre.2019.10169.1234	نشریه مهندسی منابع معدنی دوره ۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۷-۳۴	علمی و پژوهشی	چاپ شده
۲	بهبود حل معادلات ترمودینامیکی در طراحی شبکه تهویه معادن	نشریه مهندسی منابع معدنی	علمی و پژوهشی	تحت داوری
۳	Fastest Modified Model of Hardy Cross Method for Ventilation Network Analysis of Mines (Second Conflation Model) DOI: 10.22059/ijmge.2020.281156.594808	International Journal of Mining and Geo-Engineering	Scopus	پذیرش شده
۴	Improving Thermodynamic Equations in Mine Ventilation Design and Presentation of K-W Method	Mining of Mineral Deposits	Scopus	تحت داوری

مقالات ارائه شده در کنفرانس‌ها

ردیف	مقاله	کنفرانس	نوع مقاله	وضعیت
۱	طراحی تهویه معدن زغالسنگ تخت با استفاده از روش نیوتن-رافسون	دومین کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران ۲۶ دی ماه ۱۳۹۷-دانشگاه شهید چمران اهواز	کنفرانسی	چاپ شده
۲	مقایسه بین دو روش تلفیقی و مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس در تحلیل شبکه تهویه معادن	دومین کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران ۲۶ دی ماه ۱۳۹۷-دانشگاه شهید چمران اهواز	کنفرانسی	چاپ شده
۳	مقایسه بین روش‌های مختلف تهویه در معادن از نظر تحلیل سیالات	پنجمین کنگره ملی زغالسنگ ایران ۱۳۹۹	کنفرانسی	پذیرش شده
۴	مقدار جریان گرما از لایه ذغالسنگ در تونل K8 معدن ذغالسنگ رزمجا غربی	پنجمین کنگره ملی زغالسنگ ایران ۱۳۹۹	کنفرانسی	پذیرش شده

فهرست عناوین

۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۶	۲-۱- ضرورت تحقیق
۷	۳-۱- اهداف تحقیق
۸	۴-۱- فرضیات تحقیق
۹	۵-۱- ساختار رساله
۱۰	۶-۱- تعاریف
۱۳	فصل دوم: مروری بر نظریه‌های قبلی
۱۴	۱-۲- مقدمه
۱۴	۲-۲- مروری بر طراحی تهویه با استفاده از مدل تراکم‌ناپذیر بودن سیال هوا
۱۶	۱-۲-۲- روش هاردی کراس
۱۸	۲-۲-۲- روش هاردی کراس اصلاح شده‌ی ونگ
۱۹	۳-۲-۲- روش هاردی کراس اصلاح شده‌ی حلقه فضایی
۱۹	۴-۲-۲- روش هاردی کراس اصلاح شده‌ی افرائی و مدنی
۲۰	۵-۲-۲- روش تلفیقی هاردی کراس
۲۰	۶-۲-۲- روش نیوتنی هاردی کراس
۲۱	۷-۲-۲- روش مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس
۲۲	۸-۲-۲- روش مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس
۲۳	۹-۲-۲- روش نیوتن- رافسون
۲۶	۱۰-۲-۲- روش نیوتن- رافسون با جهت‌های متغیر
۲۶	۱۱-۲-۲- جمع‌بندی طراحی تهویه در مدل تراکم‌ناپذیری
۲۸	۳-۲- مروری بر طراحی تهویه با استفاده از مدل تراکم‌پذیر بودن سیال هوا
۲۸	۱-۳-۲- طراحی تهویه با استفاده از مدل هوای خشک تراکم‌پذیر
۳۰	۲-۳-۲- طراحی تهویه با استفاده از مدل هوای مرطوب تراکم‌پذیر
۳۲	۳-۳-۲- جمع‌بندی طراحی تهویه در مدل تراکم‌پذیری
۳۲	۴-۲- مروری بر نرم‌افزارهای تهویه در معادن
۳۲	۱-۴-۲- نرم‌افزار MINVENT
۳۲	۲-۴-۲- نرم‌افزار AVENT
۳۳	۳-۴-۲- نرم‌افزار VNETPC
۳۳	۴-۴-۲- نرم‌افزار VENTSIM
۳۵	فصل سوم: روش‌های جدید طراحی تهویه در معادن

۳۶	۱-۳- مقدمه
۳۶	۲-۳- روش کار
۳۷	۳-۳- روش‌های جدید طراحی تهویه در مدل تراکم‌ناپذیری
۳۷	۱-۳-۳- دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس
۴۳	۲-۳-۳- روش‌های اصلاح شده‌ی نیوتنی هاردی کراس
۴۸	۳-۳-۳- روش نیوتن- رافسون بدون مشتق
۵۲	۴-۳- روش‌های جدید طراحی تهویه در مدل تراکم‌پذیری
۵۲	۱-۴-۳- مقدمه
۵۶	۲-۴-۳- روش دلتا (Δ)
۶۰	۳-۴-۳- روش K
۶۳	۴-۴-۳- بهبود معادلات ترمودینامیکی
۶۶	۵-۴-۳- روش K-W
۷۰	۵-۳- برنامه رایانه‌ای Ventilation Design
۷۱	۱-۵-۳- پنجره اصلی برنامه رایانه‌ای
۷۱	۲-۵-۳- دستور File
۷۱	۳-۵-۳- دستور Make
۷۲	۴-۵-۳- دستور Read
۷۵	۵-۵-۳- دستور Incompressible
۷۷	۶-۵-۳- دستور Compressible
۸۷	۷-۵-۳- دستور Build
۸۷	۸-۵-۳- دستور Output
۸۷	۹-۵-۳- دستور Applications
۸۸	۱۰-۵-۳- دستور View
۸۸	۱۱-۵-۳- دستور Help
۸۸	۶-۳- روش‌های اعتبار سنجی درونی و بیرونی
۸۸	۷-۳- جمع‌بندی
۸۹	فصل چهارم: نتایج و یافته‌های مطالعات موردی
۹۰	۱-۴- مقدمه
۹۰	۲-۴- اعتبارسنجی درونی
۹۰	۱-۲-۴- اعتبارسنجی گرما در حفريات معدنی
۹۱	۲-۲-۴- اعتبارسنجی گرما در تجهیزات الکتریکی
۹۱	۳-۲-۴- اعتبارسنجی گرما در تجهیزات دیزلی

۹۲	۴-۲-۴- اعتبارسنجی گرما در ایستگاه منبع آب
۹۲	۴-۲-۵- اعتبارسنجی گرما از آب درون مجاری باز
۹۳	۴-۲-۶- اعتبارسنجی گرما از اکسایش مواد معدنی
۹۳	۴-۲-۷- اعتبارسنجی گرما از انفجار مواد منفجره
۹۴	۴-۲-۸- اعتبارسنجی گرما از حمل و نقل سنگ‌های خرد شده
۹۴	۴-۲-۹- اعتبارسنجی گرمای حاصل از پرسنل
۹۴	۴-۲-۱۰- اعتبارسنجی تحلیل مدل هوای خشک
۹۵	۴-۲-۱۱- اعتبارسنجی روش‌های قبلی تراکم‌ناپذیری
۹۵	۴-۲-۱۲- جمع‌بندی اعتبارسنجی درونی
۹۶	۴-۳- اعتبارسنجی بیرونی
۹۷	۴-۳-۱- معدن رزمجا غربی
۱۰۰	۴-۳-۲- اعتبار سنجی نتایج معدن رزمجا غربی
۱۰۳	۴-۳-۳- معدن بزرگ طزره (مدل اول)
۱۰۸	۴-۳-۴- اعتبار سنجی نتایج معدن بزرگ طزره (مدل اول)
۱۱۱	۴-۳-۵- معدن بزرگ طزره (مدل دوم)
۱۱۲	۴-۳-۶- اعتبار سنجی نتایج معدن بزرگ طزره (مدل دوم)
۱۱۵	۴-۳-۷- اعتبارسنجی تحلیل مدل هوای مرطوب
۱۱۵	۴-۳-۸- جمع‌بندی اعتبارسنجی بیرونی
۱۱۶	۴-۴- مزایای برنامه رایانه‌ای Ventilation Design
۱۱۶	۴-۴-۱- تعریف متغیرهای پویا
۱۱۶	۴-۴-۲- استفاده از ظرفیت گرمایی ویژه هوا در دو مدل ثابت و متغیر
۱۱۸	۴-۴-۳- تحلیل جریان گرما در کانال‌های مجاری باز
۱۱۹	۴-۴-۴- تحلیل جریان گرمای حاصل از انفجار مواد منفجره
۱۱۹	۴-۴-۵- تحلیل جریان گرمای حاصل از پرسنل
۱۲۱	۴-۴-۶- تحلیل جریان گرما در طول نوار نقاله
۱۲۱	۴-۵- محدودیت‌های نرم‌افزار Ventsim
۱۲۵	فصل پنجم: نتیجه‌گیری
۱۲۶	۵-۱- نتیجه‌گیری
۱۲۹	۵-۲- پیشنهادات
۱۳۱	منابع و مراجع
۱۳۷	پیوست

فهرست اشکال

۳۳	شکل ۱-۲ پنجره اصلی نرم افزار Ventsim (3.9.3a)
۳۴	شکل ۲-۲ پنجره اصلی نرم افزار Ventsim (5.2.6.8)
۳۹	شکل ۱-۳ فلوچارت دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس
۳۹	شکل ۲-۳ شبکه تهویه فرضی
۴۰	شکل ۳-۳ توزیع شدت جریان حجمی هوا توسط نرم افزار Ventsim
۴۰	شکل ۴-۳ شدت جریان های حجمی فرضی
۴۱	شکل ۵-۳ شناسایی حلقه های مفید و مستقل در شبکه تهویه فرضی
۴۱	شکل ۶-۳ نتیجه عملکرد اولین تکرار از حلقه مستقل در دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس
۴۲	شکل ۷-۳ نتیجه عملکرد اولین تکرار از اولین حلقه مفید در دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس
۴۲	شکل ۸-۳ نتیجه عملکرد اولین تکرار از دومین حلقه مفید در دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس
۵۰	شکل ۹-۳ فلوچارت روش نیوتن-رافسون بدون مشتق
۶۰	شکل ۱۰-۳ فلوچارت روش دلتا (Δ)
۶۲	شکل ۱۱-۳ فلوچارت روش K
۶۸	شکل ۱۲-۳ فلوچارت روش K-W
۷۱	شکل ۱۳-۳ پنجره اصلی برنامه رایانه ای Ventilation Design
۷۲	شکل ۱۴-۳ عملکرد دستور File
۷۲	شکل ۱۵-۳ عملکرد دستور Make
۷۳	شکل ۱۶-۳ عملکرد دستور Read-Classic
۷۳	شکل ۱۷-۳ عملکرد دستور Read-Optimum
۷۶	شکل ۱۸-۳ عملکرد دستور Incompressible-Classic-Hardy Cross
۷۶	شکل ۱۹-۳ عملکرد دستور Incompressible-Classic-Newton Raphson
۷۷	شکل ۲۰-۳ عملکرد دستور Incompressible-Optimum-Newton Raphson
۷۸	شکل ۲۱-۳ عملکرد دستور Compressible-Branch Data
۷۹	شکل ۲۲-۳ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Strate Heat
۸۰	شکل ۲۳-۳ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Electrical
۸۱	شکل ۲۴-۳ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Diesel
۸۱	شکل ۲۵-۳ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Water Sump
۸۲	شکل ۲۶-۳ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Open Drainage Channels

- شکل ۳-۲۷ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Oxidation Process ۸۲
- شکل ۳-۲۸ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Explosive ۸۳
- شکل ۳-۲۹ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Fragmented Rock ۸۴
- شکل ۳-۳۰ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Metabolic Heat ۸۵
- شکل ۳-۳۱ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Other ۸۵
- شکل ۳-۳۲ عملکرد دستور Compressible-Methods-Dry Model ۸۶
- شکل ۴-۳۳ عملکرد دستور Compressible-Methods-Certain Vaporization ۸۶
- شکل ۳-۳۴ عملکرد دستور Compressible-Methods-Uncertain Vaporization ۸۶
- شکل ۳-۳۵ عملکرد دستور Build-Run ۸۷
- شکل ۳-۳۶ عملکرد دستور Output ۸۷
- شکل ۳-۳۷ عملکرد دستور Applications ۸۷
- شکل ۴-۱ طرح شبکه تهویه معدن رزمجا غربی به همراه شدت جریان حجمی شاخه‌های آن ۹۸
- شکل ۴-۲ شدت جریان شاخه‌های شبکه تهویه معدن رزمجا غربی ۹۹
- شکل ۴-۳ شدت جریان حجمی و حلقه‌های فرضی شبکه تهویه معدن رزمجا غربی ۹۹
- شکل ۴-۴ طرح شبکه تهویه معدن رزمجا غربی در نرم‌افزار Ventsim (3.9.3a) ۱۰۱
- شکل ۴-۵ نتایج شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه) برای معدن رزمجا غربی توسط نرم‌افزار Ventsim (3.9.3a) ۱۰۲
- شکل ۴-۶ حداقل شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه) از شبکه تهویه معدن بزرگ طزره ۱۰۵
- شکل ۴-۷ کاتالوگ بادبزن VOD 21 ۱۰۶
- شکل ۴-۸ شدت جریان‌های حجمی فرضی (متر مکعب بر ثانیه) از شبکه تهویه معدن بزرگ طزره ۱۰۷
- شکل ۴-۹ طرح شبکه تهویه معدن بزرگ (مدل اول) در نرم‌افزار Ventsim (3.9.3a) ۱۰۹
- شکل ۴-۱۰ نتایج قسمتی از شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه) برای معدن بزرگ طزره (مدل اول) توسط نرم‌افزار Ventsim (3.9.3a) ۱۱۰
- شکل ۴-۱۱ طرح شبکه تهویه معدن بزرگ (مدل دوم) در نرم‌افزار Ventsim (3.9.3a) ۱۱۳
- شکل ۴-۱۲ نتایج قسمتی از شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه) برای معدن بزرگ طزره (مدل اول) توسط نرم‌افزار Ventsim (3.9.3a) ۱۱۴
- شکل ۴-۱۳ عملکرد نرم‌افزار Ventsim (5.2.6.8) در خصوص ظرفیت گرمایی ویژه هوا ۱۱۸
- شکل ۴-۱۴ عملکرد نرم‌افزار Ventsim (5.2.6.8) در خصوص ایستگاه منبع آب ۱۱۹
- شکل ۴-۱۵ عملکرد نرم‌افزار Ventsim (5.2.6.8) در خصوص انواع مدل‌های گرمایی ۱۲۰

- ۱۲۲ شکل ۴-۱۶ نتایج اولین عملکرد دستورات موازی در نرم افزار Ventsim (5.2.6.8)
- ۱۲۳ شکل ۴-۱۷ نتایج دومین عملکرد دستورات موازی در نرم افزار Ventsim (5.2.6.8)

فهرست جداول

۴	جدول ۱-۱ خلاصه‌ای از فعالیت محققین در شبکه‌های توزیع آب و گاز
۴۳	جدول ۱-۳ نتایج دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس توسط Ventilation Design
۴۴	جدول ۲-۳ نتایج مدل اصلاح شده‌ی نیوتنی هاردی کراس توسط Ventilation Design
۴۶	جدول ۳-۳ نتایج مدل اصلاح شده‌ی مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس توسط Ventilation Design
۴۸	جدول ۴-۳ نتایج مدل اصلاح شده‌ی مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس توسط Ventilation Design
۵۱	جدول ۵-۳ نتایج روش نیوتن-رافسون بدون مشتق توسط Ventilation Design
۵۹	جدول ۶-۳ نتایج مراحل روش دلتا (Δ) در طراحی تهویه برای هوای مرطوب تراکم پذیر توسط Ventilation Design
۶۳	جدول ۷-۳ نتایج مراحل روش K در طراحی تهویه برای هوای مرطوب تراکم پذیر توسط Ventilation Design
۶۵	جدول ۸-۳ ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت و دمای مختلف
۶۵	جدول ۹-۳ ظرفیت گرمایی ویژه هوا در حجم ثابت و دمای مختلف
۷۰	جدول ۱۰-۳ نتایج روش K-W برای طراحی تهویه هوای مرطوب تراکم پذیر
۷۴	جدول ۱۱-۳ فایل گره مربوط به شکل ۲-۳
۷۴	جدول ۱۲-۳ فایل شاخه در مدل کلاسیک مربوط به شکل ۲-۳
۷۵	جدول ۱۳-۳ فایل شاخه در مدل اپتیموم مربوط به شکل ۲-۳
۷۵	جدول ۱۴-۳ فایل حلقه مربوط به شکل ۲-۳
۹۱	جدول ۱-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرمای حفریات معدنی
۹۱	جدول ۲-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرمای تجهیزات الکتریکی
۹۲	جدول ۳-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرمای تجهیزات دیزلی
۹۲	جدول ۴-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرما در ایستگاه منبع آب
۹۳	جدول ۵-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرمای آب درون مجاری باز
۹۳	جدول ۶-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرما از اکسایش مواد معدنی
۹۳	جدول ۷-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرما از انفجار مواد منفجره
۹۴	جدول ۸-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرما از حمل و نقل سنگ‌های خرد شده
۹۴	جدول ۹-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرمای حاصل از پرسنل
۹۵	جدول ۱۰-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای تحلیل مدل هوای خشک
۹۵	جدول ۱۱-۴ تعریف متغیرهای Cp و R در منابع مختلف
۹۶	جدول ۱۲-۴ نتایج اعتبارسنجی درونی از روش‌های قبلی تراکم‌ناپذیری

- جدول ۴-۱۳ نتایج اعتبارسنجی درونی از مدل تراکم‌پذیری ۹۶
- جدول ۴-۱۴ مقاومت شاخه‌های شبکه تهویه معدن رزمجا غربی (کیلومورگ) ۱۰۰
- جدول ۴-۱۵ عملکرد روش‌های مختلف بر تهویه معدن رزمجا غربی ۱۰۰
- جدول ۴-۱۶ نتایج شدت جریان حجمی برای معدن رزمجا غربی ۱۰۳
- جدول ۴-۱۷ حلقه‌های فرضی در شبکه تهویه معدن بزرگ ۱۰۶
- جدول ۴-۱۸ عملکرد روش‌های مختلف بر تهویه معدن بزرگ (مدل اول) توسط Ventilation Design ۱۰۸
- جدول ۴-۱۹ نتایج قسمتی از شدت جریان حجمی برای معدن بزرگ طزره (مدل اول) ۱۱۰
- جدول ۴-۲۰ عملکرد روش‌های مختلف بر تهویه معدن بزرگ (مدل دوم) توسط Ventilation Design ۱۱۱
- جدول ۴-۲۱ نتایج قسمتی از شدت جریان حجمی برای معدن بزرگ طزره (مدل دوم) ۱۱۴
- جدول ۴-۲۲ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای تحلیل مدل هوای مرطوب به دو روش دلتا و K ۱۱۵
- جدول ۴-۲۳ نتایج اعتبارسنجی بیرونی از مدل تراکم‌ناپذیری ۱۱۶
- جدول ۴-۲۴ نتایج اعتبارسنجی بیرونی از مدل تراکم‌پذیری ۱۱۶

اختصارات رساله

علايم و اختصارات			
فشار كل هوا	P	ارتفاع نقطه مبدا	Z_1
دمای هوای خشک	T	فشار استاتیکی سیال در نقطه مبدا	P_1
تغییرات انرژی پتانسیل	Δ_{ep}	سرعت سیال در نقطه مبدا	V_1
تغییرات انرژی جنبشی	Δ_{ek}	چگالی سیال در نقطه مبدا	γ_1
قدرت بادبزن	W_{12}	ارتفاع نقطه مقصد	Z_2
اصطکاک کار معدنی	F_{12}	فشار استاتیکی سیال در نقطه مقصد	P_2
مقدار گرما بین دو ایستگاه	q_{12}	سرعت سیال در نقطه مقصد	V_2
ضریب ثابت هوای خشک	R_d	چگالی سیال در نقطه مقصد	γ_2
دمای هوای خشک در ایستگاه ۱	t_{d1}	افت فشار اصطکاکی بین دو ایستگاه	ΔP_f
دمای هوای خشک در ایستگاه ۲	t_{d2}	جرم حجمی متوسط هوا بین دو ایستگاه	$\rho:r$
ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت	c_p	ضریب اصطکاک بدون بعد	f
فشار هوای خشک	P_d	طول مسیر حفاری	L
فشار بخار آب	P_v	محیط مقطع حفاری	P_e
جرم حجمی هوای خشک	$\rho_d:r_d$	سطح مقطع حفاری	S
جرم حجمی هوای مرطوب	$\rho_m:r:r_m$	سرعت متوسط هوا بین دو ایستگاه	V
گرمای نهان تبخیر آب	L	مقاومت اصطکاکی کار معدنی	R
فشار بخار آب اشباع	P_{vs}	شدت جریان حجمی متوسط هوا بین دو ایستگاه	Q
نسبت رطوبت اشباع هوا	w_s	خطای محاسبات	Δ
نسبت رطوبت هوا	w	تعداد حلقه‌های مفید	N_R
فشار بخار آب اشباع در دمای خشک هوا	P_{vsd}	تعداد شاخه‌ها در شبکه تهویه	N_B
رطوبت نسبی هوا	R_h	تعداد گره‌ها در شبکه تهویه	N_J
ظرفیت گرمایی ویژه بخار آب در فشار ثابت	c_{pv}	افت فشار هر حلقه	P_k
شتاب ثقل واقعی کره زمین	g	فشار استاتیکی بادبزن در هر شاخه	P_{Fi}
شتاب ثقل مبنای کره زمین	g_0	فشار تهویه طبیعی در هر شاخه	P_{Ni}
ظرفیت گرمایی ویژه هوا در حجم ثابت	c_v	اختلاف ارتفاع از سطح آب‌های آزاد	h

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

ترکیب هوا در فضاهای زیرزمینی محصور شده در اثر فرآیندهایی همچون تنفس کارکنان، انفجار مواد منفجره، نفوذ گازهای مضر از شکاف سنگ‌ها و گاز خیزی مواد معدنی پیوسته تغییر می‌یابد. هر چند این فضاهای زیرزمینی توسط حفاریاتی همچون تونل، دوپل و چاه به سطح زمین یعنی هوای آزاد ارتباط دارند اما این ارتباط برای به جریان انداختن کامل هوا در برخی شبکه فضاهای زیرزمینی کافی نیست. بر این اساس لازم است هوای تمیز به صورت مصنوعی و با استفاده از وسایل مختلف به داخل فضای زیرزمینی وارد شود. جهت برآورد مقدار و چگونگی توزیع هوای تمیز در فضای زیرزمینی نیاز به دانستن علم تهویه است (الهی، ۱۳۹۳ الف، مدنی، ۱۳۸۵).

طراحی تهویه فضاهای زیرزمینی بر پایه اصولی همچون تهیه نقشه، شناسایی شاخه‌ها و گره‌های شبکه تهویه، محاسبه مقاومت معدنی و محاسبه شدت جریان حجمی هوا برای هر یک از شاخه‌ها و شدت جریان حجمی اصلاح شده آن‌ها، محاسبه افت فشار برای هر یک از شاخه‌ها، محاسبه تهویه طبیعی، تعدیل شبکه و انتخاب دریچه یا بادبزن مناسب به همراه انتخاب بادبزن اصلی شبکه استوار است (الهی، ۱۳۹۳ الف، مدنی، ۱۳۸۲).

برای طراحی تهویه معادن چندین دیدگاه از نظر تحلیل سیالاتی و روش طراحی وجود دارد. طراحی تهویه از نظر تحلیل سیالاتی، در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری تحلیل می‌شود و از نظر روش طراحی در دو روش دستی و رایانه‌ای ارائه شده است. شرط انتخاب نوع روش به هدف از تحلیل شبکه تهویه بستگی دارد. اگر شدت جریان حجمی شاخه‌های یک شبکه فضای زیرزمینی به همراه جهت آن مشخص و ثابت باشند در این صورت بهتر است جهت تحلیل این شبکه معدنی از روش

دستی استفاده شود. در روش دستی بادبزن‌های اصلی، فرعی و دریچه‌های تنظیم کننده هوا طراحی می‌شود (الهی، ۱۳۹۳، الف، مدنی، ۱۳۸۲).

اگر هدف از تحلیل شبکه‌های تهویه، بررسی تاثیر یک یا چند بادبزن بر شبکه فضای زیرزمینی باشد در این صورت بهتر است از روش‌های تقریبی ریاضی استفاده شود زیرا تحلیل شبکه‌های پیچیده به روش دستی نیاز به صرف وقت زیادی است. در تحلیل شبکه تهویه فضاهای زیرزمینی بر اساس روش‌های تقریبی ریاضی یک شدت جریان حجمی فرضی با جهت فرضی در هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه با توجه به قانون گره‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس با معلوم بودن بادبزن‌های شبکه تهویه و معادلات تقریبی ریاضی می‌توان خطای هر حلقه در شبکه تهویه را برآورد و بر این اساس شدت جریان حجمی فرضی هوا تصحیح می‌شود. عملیات تصحیح شدت جریان حجمی هوا براساس معادله ریاضی ارائه شده باید چندین بار تکرار شود تا خطای محاسبات کمتر یا مساوی دقت انجام محاسبات شود. استفاده از روش‌های تقریبی ریاضی برای حل شبکه‌های حجیم و پیچیده توسط انسان تقریباً امری غیر ممکن بوده بنابراین استفاده از رایانه جهت حل آن‌ها امری ضروری است. نرم‌افزارهای رایانه‌ای مختلفی برای تحلیل شبکه‌های تهویه در فضاهای زیرزمینی ارائه شده که یکی از معروف‌ترین آن‌ها نرم‌افزار Ventsim است. این نرم‌افزار بر اساس معادله هاردی کراس^۱ طراحی شد (الهی، ۱۳۹۳، الف، مدنی، ۱۳۸۵).

اولین معادله ریاضی ارائه شده جهت تخمین خطای شدت جریان حجمی هر حلقه توسط هاردی کراس مطرح و بیان شد (Cross, 1936). هر چند این معادله جهت تحلیل شبکه‌های آب مطرح شد اما بعدها این معادله توسط ونگ^۲ در امر تحلیل شبکه تهویه فضاهای زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت و توسط او تصحیح گردید (Wang, 1982a, El-Nagdy, 2008). همچنین جهت همگرایی سریع‌تر معادله هاردی کراس برای رسیدن به جواب نهایی، روش حلقه فضایی (Brkic, 2009)، روش افرائی و مدنی (افرائی و مدنی، ۱۳۹۱)، روش‌های نیوتنی (Moosavian and

¹ Hardy Cross

² Wang

Jaefarzadeh, 2014b) و روش تلفیقی (الهی، ۱۳۹۳ب) توسعه داده شده است. علاوه بر روش‌های یاد شده روش‌های دیگری همچون روش نیوتن-رافسون^۱ و مدل اصلاح شده آن (مدنی و ملکی، ۱۳۸۶، Wang, 1989)، روش نیوتن-رافسون با جهت‌های متغیر (الهی، ۱۳۹۸)، روش مسیر بحرانی (Wang, 1982b)، روش آنالیز خطی (Bhamidipati and Procarion, 1985, Kamba et al., 1995)، روش برنامه‌ریزی غیرخطی (Wang, 1984, Hu and Longson, 1990) و تکنیک‌های بهینه‌سازی (Collins, et al., 1978) نیز ارائه شده است.

همچنین از روش‌های تقریبی ریاضی همچون روش هاردی کراس، روش نیوتن-رافسون و روش خطی به طور وسیع و گسترده در شبکه‌های مختلف توسط محققین متعدد مطابق جدول ۱-۱ مورد استفاده قرار گرفته است. شرط‌های اولیه در اکثر روابط مورد استفاده در جدول ۱-۱ بر اساس پارامترهای مهمی همچون موقعیت جغرافیایی مخازن، حجم مخازن، سطح مقطع مخازن و ارتفاع مخازن آب است و طبق این پارامترها مقادیر شدت جریان حجمی فرضی اولیه برآورد می‌شوند. زیرا اکثر محققین در حوزه عمرانی معتقدند جهت افزایش سرعت همگرایی در روش‌های تقریبی ریاضی بالاخص دو روش هاردی کراس و نیوتن-رافسون به جواب نهایی لازم است ابتدا مقادیر شدت جریان حجمی فرضی اولیه مناسب و صحیحی انتخاب شوند و سپس روش‌های مذکور مورد استفاده قرار گیرند. در بین روابط و روش‌های ارائه شده در جدول ۱-۱ فقط تعداد معدودی از آن‌ها می‌توانند در تحلیل شبکه تهویه معادن مورد استفاده قرار گیرند. یکی از آن روش‌ها، روش هاردی کراس اصلاح شده است که توسط موسویان و جعفرزاده (Moosavian and Jaefarzadeh, 2014b) مطرح شده است.

جدول ۱-۱ خلاصه‌ای از فعالیت محققین در شبکه‌های توزیع آب و گاز

مؤلف	سال انتشار	شرح
Chiplunkar, et al.,	۱۹۹۰	تجزیه و تحلیل شبکه‌های توزیع آب و بررسی انواع روش‌ها

¹ Newton-Raphson

ادامه جدول ۱-۱ خلاصه‌ای از فعالیت محققین در شبکه‌های توزیع آب و گاز

تجزیه و تحلیل جریان حجمی در شبکه توزیع آب و بررسی انواع روش‌ها	۱۹۹۱	Pramod
بهینه سازی سیستم توزیع آب	۱۹۹۳	Gupta, et al.,
طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب بر اساس مدل خطی	۱۹۹۴	Eiger, et al.,
تجزیه و تحلیل سیستم های توزیع آب بر اساس مدل غیرخطی	۱۹۹۶	Basha and Kassab
بهبود الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شبکه آب	۱۹۹۶	Dandy, et al.,
استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک برای حداقل کردن هزینه طراحی شبکه های توزیع آب	۱۹۹۷	Savic and Walters
بهینه سازی سیستم توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک	۱۹۹۹	Gupta, et al.,
هیدرولیک سیستم های خط لوله	۲۰۰۰	Bruce, et al.,
طراحی توزیع شبکه‌های آب با استفاده از اندیس انعطاف-پذیری مسیر ابتکاری	۲۰۰۰	Todini
استفاده از الگوریتم های بهینه سازی کلونی‌های مورچه برای بهینه سازی سیستم توزیع آب	۲۰۰۲	Zecchin, et al.,
مدل سازی و شبیه سازی سیستم‌های آب بر اساس معادلات حلقه به روش درختی با تصمیم‌گیری اپراتور	۲۰۰۴	Arsene, et al.,
راهنمای تجزیه و تحلیل جامع سیستم های توزیع آب برای مهندسين و برنامه ریزان	۲۰۰۶	Boulos, et al.,
بررسی معادلات حاکم بر جریان ثابت در خطوط لوله گاز و بررسی ضریب اصطکاک در لوله‌ها	۲۰۰۷	Coelho and Pinho
روش سوم مدل نیوتنی برای حل سیستم های معادلات غیر خطی	۲۰۰۷	Darvishi and Barati
بررسی اتصالات لوله‌ها و تاثیر آن بر توزیع شبکه‌های آب	۲۰۱۰	Giustolisi
روش شانزدهم مدل نیوتنی برای حل سیستم های معادلات غیر خطی	۲۰۱۰	Li, et al.,
استفاده از تکنیک‌هایی با کارایی بالا برای تسریع حل کننده‌های هیدرولیکی بر اساس مدل خطی	۲۰۱۲	Michele, et al.,
کاربرد تئوری گراف خطی در توزیع شبکه‌های آب بر اساس سطح مقطع مخزن حجم مخزن	۲۰۱۳	Ayad, et al.,
آنالیز هیدرولیکی شبکه توزیع آب با فرضیه پیچیده برای جریان‌هایی با مقدار صفر	۲۰۱۴ الف	Moosavian and Jaefarzadeh
آنالیز هیدرولیکی شبکه توزیع آب با استفاده از روش هاردی کراس بر اساس سومین و شانزدهمین روش نیوتنی	۲۰۱۴ ب	Moosavian and Jaefarzadeh
تست حل کننده‌های خطی برای الگوریتم متحرک کلی	۲۰۱۴	Giustolisi and Moosavian

ادامه جدول ۱-۱ خلاصه‌ای از فعالیت محققین در شبکه‌های توزیع آب و گاز

توزیع شبکه‌های آب و بهینه‌سازی آن بر اساس ارتفاع سطح آب در مخازن آب	۲۰۱۵	Boanoa, et al.,
شناسایی حداقل تعداد حلقه‌ها در توزیع شبکه‌های آب	۲۰۱۵	Creacoa and Franchinib
بهبود توزیع شبکه‌های آب با استفاده از تشابه توپولوژیکی بر اساس ارتفاع سطح آب در مخازن آب	۲۰۱۶	Singh, et al.,
اصلاح تکنیک نیوتن-رافسون در روش هاردی کراس بر اساس فشار آب در گره‌ها برای شبکه‌های توزیع آب	۲۰۱۸	Jha and Mishra

همچنین در تحلیل شبکه تهویه معادن لازم است مسائل انتقال گرما بین سطح زمین و

فضاهای زیرزمینی مطرح شود که مهمترین آن‌ها به شرح ذیل است:

الف- انتقال گرما از حفاریات معدنی با سطوح خشک و مرطوب

ب- انتقال گرمای ناشی از تراکم خود به خود هوا

ج- انتقال گرمای ناشی از آب‌های داخل معدن

د- انتقال گرمای ناشی از تجهیزات و ماشین آلات معدنی

ه- انتقال گرمای ناشی از فرآیند اکسایش

و- انتقال گرمای ناشی از مواد منفجره

ز- انتقال گرمای ناشی از حمل و نقل مواد معدنی و باطله

ح- انتقال گرمای ناشی از حضور پرسنل

بنابراین از این دیدگاه، مساله تراکم‌پذیری سیال هوا در علم تهویه مطرح می‌شود. این مسائل

توسط محققین مختلفی همچون مدنی، مسفرسون^۱ و هال^۲ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است

(مدنی، ۱۳۸۲، McPherson, 1993, Hall, 1998).

۱-۲- ضرورت تحقیق

در علم تهویه در معادن، سیال هوا می‌تواند از دو دیدگاه تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری مورد

¹ McPherson

² Hall

تحلیل قرار گیرد. از دیدگاه تراکم‌ناپذیری، روش‌های مختلفی برای طراحی تهویه معادن ارائه شده که روش هاردی کراس و نیوتن-رافسون از رایج‌ترین آن‌هاست. در روش هاردی کراس برای رسیدن به جواب نهایی نیاز به انجام تعداد تکرار بیشتری از محاسبات ریاضی است. بر این اساس جهت کاهش تعداد تکرار محاسبات ریاضی در این روش، روش‌های مفید دیگری همچون روش اصلاح شده ونگ، روش حلقه فضایی، روش تلفیقی، مدل سومین و شانزدهمین مرتبه روش نیوتنی ارائه شده‌اند ولی در اکثر روش‌ها هنوز تعداد تکرارهای محاسبات ریاضی به طور معمول کاهش نیافته‌اند و یا در صورت کاهش، سبب پیچیدگی روش شده‌اند. بنابراین بهبود روش هاردی کراس از نظر کاهش تعداد تکرار محاسبات ریاضی و سهولت کاربرد به عنوان ضرورت تحقیق در این رساله مطرح می‌شود. همچنین مطالعات انجام شده در روش نیوتن-رافسون اصلاح شده ونگ بیانگر این مطلب است که روش مذکور در بعضی از مدل‌ها برای رسیدن به جواب نهایی از همگرایی تبعیت نمی‌کند و قادر به یافتن جواب نهایی نیست و از حجم محاسبات ریاضی زیادی برخوردار است. بنابراین همگرایی برای رسیدن به جواب نهایی، کاهش حجم محاسبات ریاضی و سهولت کاربرد به عنوان ضرورت تحقیق روش نیوتن-رافسون اصلاح شده ونگ در این رساله مطرح می‌شود.

مطالعات انجام شده از دیدگاه تراکم‌پذیری سیال هوا در تحلیل شبکه تهویه معادن بیانگر این مطلب است که روش‌های رایج ارائه شده در برخی از شبکه‌های تهویه سبب افزایش حجم محاسبات ریاضی و پیچیدگی روش شده و نیازمند بازنگری است. بنابراین بازنگری روش‌های تحلیل تراکم‌پذیری سیال هوا در علم تهویه برای سهولت کاربرد به عنوان ضرورت تحقیق در این رساله مطرح می‌شود. همچنین نرم‌افزاری که بتواند تمام مسائل انتقال گرما با فرضیات مختلف را در حفاریات معدنی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد تا کنون به طور کامل ارائه نشده است بر این اساس ارائه یک برنامه رایانه‌ای جامع به عنوان ضرورت تحقیق در این رساله مطرح می‌شود.

۱-۳- اهداف تحقیق

هدف کلی در این رساله، ارائه یک مدل ریاضی برای تحلیل شبکه تهویه معادن براساس

همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی است. بر این اساس برای دسترسی سریع‌تر به همگرایی نیازمند است اهدافی همچون تعداد تکرار محاسبات ریاضی به همراه زمان انجام محاسبات آن کاهش یابد. علاوه بر اهداف فوق، تحلیل دقیق مسائل انتقال گرما در حفريات معدنی و تاثیر آن بر شبکه تهویه معادن از موارد با اهمیت در این رساله است. بر این اساس اهداف تحقیق در این رساله به شرح ذیل بیان می‌شوند:

الف- بهبود روش هاردی کراس از نظر کاهش تعداد تکرار محاسبات ریاضی به همراه کاهش زمان انجام محاسبات آن و سهولت کاربرد

ب- بهبود روش نیوتن-رافسون از نظر همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی و سهولت کاربرد

ج- کد نویسی روش‌های جدید هاردی کراس و نیوتن-رافسون

د- بهبود تحلیل مسائل انتقال گرما در شبکه تهویه معادن

ه- کد نویسی مساله انتقال گرما در شبکه تهویه معادن

۴-۱- فرضیات تحقیق

اولین مرحله از تحلیل شبکه‌های تهویه با استفاده از روش‌های تقریبی ریاضی، توزیع شدت جریان حجمی فرضی درون شبکه تهویه با استفاده از دو مدل تصادفی و غیرتصادفی است که در مدل غیرتصادفی از قانون شدت جریان کیرشف^۱ تبعیت کرده و مبنای محاسبات ریاضی انواع روش‌های هاردی کراس و نیوتن-رافسون است. دومین مرحله از تحلیل شبکه‌های تهویه، محاسبه افت فشار هوا برای هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه با استفاده از معادلات برنولی^۲ و اتکینسون^۳ است. سومین مرحله از تحلیل شبکه‌های تهویه، تعدیل افت فشار هوا برای هر یک از حلقه‌های شبکه تهویه با استفاده از قانون افت فشار کیرشف است. بر این اساس فرضیات تحقیق که به عنوان محدودیت‌های پژوهش مطرح می‌شود به شرح ذیل بیان می‌شوند:

¹ Kirchhof

² Bernoulli

³ Atkinson

الف- توزیع شدت جریان فرضی درون شبکه تهویه براساس قانون شدت جریان کیرشف

ب- محاسبه افت فشار هوای برای هر شاخه از شبکه تهویه براساس رابطه اتکینسون

ج- تعدیل افت فشار هوای برای هر حلقه از شبکه تهویه براساس قانون افت فشار کیرشف

۱-۵- ساختار رساله

گزارش رساله در پنج فصل تنظیم شده است. فصل اول به کلیات موضوع رساله اختصاص دارد. در فصل دوم مروری بر نظریه‌های قبلی است که در مدل تراکم‌ناپذیری روش‌های هاردی کراس، هاردی کراس مدل ونگ، هاردی کراس مدل حلقه فضایی، هاردی کراس مدل افراپی و مدنی، مدل تلفیقی هاردی کراس، مدل نیوتنی هاردی کراس، مدل مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس، مدل مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس، نیوتن- رافسون مدل ونگ و نیوتن- رافسون با جهت‌های متغیر ارائه شده است. همچنین در مدل تراکم‌پذیری روش تحلیل هوای خشک و مرطوب در طراحی تهویه معادن ارائه شده سپس مروری بر انواع نرم‌افزارهای تهویه در معادن مطرح و نهایتاً جمع‌بندی طراحی تهویه معادن در مدل‌های تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری در پایان این فصل آورده شده است.

در فصل سوم روش‌های جدید طراحی تهویه در معادن در مدل‌های تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری ارائه شده است. ابتدا روش کار و سپس در مدل تراکم‌ناپذیری، پنج روش مختلف همچون دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس، روش نیوتن- رافسون بدون مشتق و سه روش اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس ارائه شده است. همچنین در مدل تراکم‌پذیری، سه روش مختلف جهت تحلیل هوای خشک و مرطوب با نام‌های روش دلتا (Δ)، روش K و روش K-W ارائه شده است. همچنین در این فصل برنامه رایانه‌ای تحت ویندوز با نام Ventilation Design برای کاهش خطا و افزایش دقت انجام محاسبات ریاضی با حداقل بازه زمانی ارائه شده و نهایتاً جمع‌بندی روش‌های جدید طراحی تهویه معادن در مدل‌های تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری در پایان این فصل ارائه شده است.

در فصل چهارم نتایج و یافته‌های مطالعات موردی است که در دو مدل تراکم‌پذیری و تراکم‌ناپذیری برای اعتبارسنجی درونی و بیرونی از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design ارائه شده

سپس مزایای برنامه رایانه‌ای Ventilation Design و محدودیت‌های نرم‌افزار Ventsim ارائه شده است.

در فصل پنجم به نتیجه‌گیری نهایی از این رساله و ارائه پیشنهادات برای مطالعات آینده اختصاص داده شده است.

۱-۶- تعاریف

- هوای خشک

مخلوطی از هوا که شامل همه گازهای موجود در هوا بدون بخار آب را هوای خشک گویند.

- هوای مرطوب

مخلوطی از هوا که شامل همه گازهای موجود در هوا به همراه بخار آب را هوای مرطوب گویند.

- جرم حجمی هوای خشک

نسبت جرم هوای خشک بر واحد حجم هوا را جرم حجمی هوای خشک گویند.

- جرم حجمی هوای مرطوب

نسبت مجموع جرم هوای خشک و بخار آب بر واحد حجم هوا را جرم حجمی هوای مرطوب

گویند.

- جرم حجمی هوا

مجموع جرم حجمی هوای خشک و مرطوب را جرم حجمی هوا گویند.

- فشار هوای خشک

طبق رابطه ۱-۱ فشار هوای خشک برابر حاصل ضرب جرم حجمی هوای خشک (ρ_d) در

ضریب ثابت هوای خشک (R_d) در دمای خشک هوا (T) است.

$$P_d = \rho_d R_d T \quad (1-1)$$

- فشار جزئی بخار آب

طبق رابطه ۲-۱ فشار جزئی بخار آب برابر حاصل ضرب جرم حجمی هوای مرطوب (ρ_v) در

ضریب ثابت بخار آب (R_v) در دمای خشک هوا (T) است.

$$P_v = \rho_v R_v T \quad (۲-۱)$$

- فشار کلی هوا

به مجموع فشار خشک هوا و فشار جزئی بخار آب را فشار کلی هوا گویند.

- فشار استاتیکی هوا

این فشار معادل نیرویی است که هوای ساکن بر واحد سطح ایجاد می کند.

- فشار دینامیکی هوا

این فشار معادل نیرویی است که هوای در حال حرکت بر واحد سطح ایجاد می کند.

- رطوبت نسبی هوا

به نسبت فشار جزئی بخار آب موجود در هوا بر فشار جزئی حالت اشباع را رطوبت نسبی هوا

گویند.

- نسبت رطوبت هوا

به نسبت جرم بخار آب موجود در یک کیلوگرم از هوای خشک و بخار آب بر جرم یک کیلوگرم

هوا را نسبت رطوبت هوا گویند.

- ماده تراکم ناپذیر

ماده ای که حجم مخصوص آن تغییر نکند را ماده تراکم ناپذیر گویند.

- ماده تراکم پذیر

ماده ای که حجم مخصوص آن تغییر کند را ماده تراکم پذیر گویند.

- حلقه

مسیری است که گره ابتدایی و انتهایی آن بر هم منطبق هستند.

- قانون شدت جریان کیرشف

طبق این قانون مجموع شدت جریان های ورودی و خروجی در هر گره برابر صفر است.

- قانون افت فشار کیرشف

طبق این قانون مجموع افت فشار شاخه‌های موجود در هر حلقه برابر صفر است.

فصل دوم

مروری بر نظریه‌های قبلی

۲-۱- مقدمه

به طور معمول تهویه معادن برپایه‌ی تحلیل سیالات استوار است. سیال مورد نظر در علم تهویه معدن هواست. از نظر علم سیالات، سیال هوا در شرایط مختلف رفتارهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهد. بر این اساس در روش تحلیل سیالات مربوط به علم تهویه معدن می‌توان سیال هوا را از دو دیدگاه مدل تراکم‌ناپذیری و مدل تراکم‌پذیری تحلیل کرد. در این فصل، تعدادی از نظریه‌های علمی قبلی در خصوص تحلیل تهویه معدن در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری با استفاده از معادله اتکینسون و معادلات ترمودینامیکی همچون روش هاردی کراس، هاردی کراس اصلاح شده ونگ، هاردی کراس اصلاح شده حلقه فضایی، هاردی کراس اصلاح شده افراشی و مدنی، مدل تلفیقی هاردی کراس، روش نیوتن-رافسون، نیوتن-رافسون اصلاح شده مدل ونگ، نیوتن-رافسون با جهت‌های متغیر، تحلیل مدل هوای خشک و مرطوب ترمودینامیکی مرور می‌شود.

۲-۲- مروری بر طراحی تهویه با استفاده از مدل تراکم‌ناپذیر بودن سیال هوا

محققین در تهویه معدن کاری زیرزمینی معتقدند اگر عمق معدن کاری نسبت به بالاترین خط تراز توپوگرافی آن کمتر از ۵۰۰ متر باشد می‌توان سیال هوا را در تهویه این معادن از نوع سیال تراکم‌ناپذیر فرض کرد. بر این اساس در طراحی تهویه معادن با فرض سیال تراکم‌ناپذیر اغلب از روش‌های برنولی و اتکینسون استفاده می‌شود. به طور معمول در این معادلات مسائل رطوبت و گرما در حفاریات معدنی منظور نمی‌شوند و هوای جاری در حفاریات معدن از نوع هوای خشک با چگالی

ثابت فرض می‌شود. معادلات برنولی و اتکینسون به ترتیب مطابق معادلات شماره ۱-۲ و

۲-۲ تفسیر می‌شوند (مدنی، ۱۳۸۲، McPherson, 1993, Hall, 1998)

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum H \quad (1-2)$$

Z_1 : ارتفاع نقطه مبدا (متر)

P_1 : فشار استاتیکی سیال در نقطه مبدا (پاسکال)

V_1 : سرعت سیال در نقطه مبدا (متر بر ثانیه)

γ_1 : چگالی سیال در نقطه مبدا (نیوتن بر متر مکعب)

Z_2 : ارتفاع نقطه مقصد (متر)

P_2 : فشار استاتیکی سیال در نقطه مقصد (پاسکال)

V_2 : سرعت سیال در نقطه مقصد (متر بر ثانیه)

γ_2 : چگالی سیال در نقطه مقصد (نیوتن بر متر مکعب)

$\sum H$: افت فشار کلی سیال در بین دو ایستگاه (متر)

$$\Delta P_f = \rho \frac{f}{2} \frac{L P_e}{S} V^2 = R Q^2 \quad (2-2)$$

ΔP_f : افت فشار اصطکاکی بین دو ایستگاه (پاسکال)

ρ : جرم حجمی متوسط هوا بین دو ایستگاه (کیلوگرم بر متر مکعب)

f : ضریب اصطکاک بدون بعد

L : طول مسیر حفاری (متر)

P_e : محیط مقطع حفاری (متر)

S : سطح مقطع حفاری (متر مربع)

V : سرعت متوسط هوا بین دو ایستگاه (متر بر ثانیه)

R : مقاومت اصطکاکی کار معدنی (NS^2 / m^8)

Q : شدت جریان حجمی متوسط هوا بین دو ایستگاه (متر مکعب بر ثانیه)

در مرور علمی از نظریه‌های قبلی در خصوص تحلیل شبکه تهویه معادن از دیدگاه سیال تراکم‌ناپذیر از معادله اتکینسون استفاده شده است. برای حل معادله اتکینسون از روش‌های تقریبی ریاضی برای حل شبکه تهویه معادن استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی در این زمینه بر پایه روش‌های هاردی کراس و روش‌های نیوتن-رافسون ارائه شده که تعدادی از آن‌ها در ادامه مرور شده است.

۲-۲-۱- روش هاردی کراس

روش هاردی کراس یکی از روش‌های رایج در تحلیل شبکه تهویه فضاهای زیرزمینی است. معادله معروف هاردی کراس در سال ۱۹۳۶ میلادی به شرح ذیل مطرح شده و مقدار خطای شدت جریان حجمی هر حلقه، طبق رابطه ۲-۳ برآورد می‌شود (Cross, 1936).

$$\begin{aligned} &\begin{cases} Q = Q_0 + \Delta \\ \Delta P = R Q^n \end{cases} \rightarrow R Q^n = R (Q_0 + \Delta)^n \\ &R Q^n = R (Q_0^n + n \Delta Q_0^{n-1} + \dots) \\ &R Q^n \cong R Q_0^n + n R \Delta Q_0^{n-1} \\ &\rightarrow \sum R Q^n = \sum R Q_0^n + \Delta \sum n R Q_0^{n-1} \\ &\rightarrow \begin{cases} \sum R Q^n = 0 \\ \sum R Q_0^n = -\Delta \sum n R Q_0^{n-1} \end{cases} \\ &\rightarrow \Delta = -\frac{\sum R Q_0^n}{\sum n R Q_0^{n-1}} \xrightarrow{n=2} \Delta = -\frac{\sum R Q_0^2}{2 \sum R Q_0} \\ &\rightarrow \Delta = -\frac{\sum \pm \Delta P_i}{2 \sum R_i Q_i} = -\frac{\sum \pm R_i Q_i^2}{2 \sum R_i Q_i} \quad (2-3) \end{aligned}$$

Q : شدت جریان حجمی واقعی (متر مکعب بر ثانیه)

Q_0 : شدت جریان حجمی فرضی یا اولیه (متر مکعب بر ثانیه)

Δ : خطای شدت جریان حجمی حلقه (متر مکعب بر ثانیه)

R: مقاومت کار معدنی هر شاخه (کیلومورگ)

ΔP : افت فشار هر شاخه (میلیمتر آب)

تحلیل معادله هاردی کراس بر اساس چندین مرحله استوار است که مراحل مختلف آن به شرح ذیل بیان می‌شود:

مرحله اول: با توجه به قانون گره‌ها یک شدت جریان حجمی فرضی با جهت فرضی برای هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه در نظر گرفته می‌شود.

مرحله دوم: شناسایی حلقه‌های مفید در شبکه تهویه طبق رابطه ۲-۴ و انتخاب یک جهت فرضی برای آن‌ها

$$N_R = N_B - N_J + 1 \quad (۲-۴)$$

N_R : تعداد حلقه‌های مفید

N_B : تعداد شاخه‌ها در شبکه تهویه

N_J : تعداد گره‌ها در شبکه تهویه

مرحله سوم: محاسبه افت فشار هوا برای هر یک از شاخه‌های موجود در حلقه طبق رابطه ۲-۵

$$\Delta P = R Q^2 \quad (۲-۵)$$

مرحله چهارم: محاسبه مقدار خطای شدت جریان حجمی هر حلقه براساس رابطه ۲-۱. لازم به ذکر است اگر جهت جریان هوا در شاخه‌ای با جهت جریان حلقه هم جهت باشد در این صورت افت فشار آن شاخه با علامت مثبت در غیر این صورت با علامت منفی در صورت معادله ظاهر می‌شود. همچنین مخرج کسر در معادله مطرح شده بدون تعیین علامت آن همواره از علامت مثبت برخوردار خواهد بود.

مرحله پنجم: محاسبه شدت جریان حجمی جدید شاخه‌های شبکه تهویه. ابتدا در این مرحله بررسی می‌شود هر شاخه تحت تاثیر چند حلقه قرار می‌گیرد. سپس علامت مثبت یا منفی خطای هر حلقه تاثیرگذار تعیین و نهایتاً با جمع جبری شدت جریان حجمی شاخه مورد نظر با مقدار خطای

شدت جریان حجمی حلقه‌های تاثیرگذار می‌توان شدت جریان حجمی جدید هر شاخه را در شبکه تهویه برآورد کرد. لازم به ذکر است اگر جهت حلقه هم جهت با جهت جریان شاخه باشد در این صورت مقدار خطای حلقه در علامت مثبت و در غیر این صورت در علامت منفی باید ضرب شود. همچنین اگر مقدار شدت جریان حجمی جدید حجمی شاخه‌ای منفی شود در این صورت باید جهت جریان هوا در شاخه مورد نظر برعکس شود.

مرحله ششم: عملیات فوق از مرحله سوم تا پنجم باید چندین بار تکرار شود تا خطای محاسبات کمتر یا مساوی دقت انجام محاسبات شود.

۲-۲-۲- روش هاردی کراس اصلاح شدهی ونگ

تصحیح ونگ مربوط به مرحله چهارم از مراحل حل روش هاردی کراس است که در سال ۱۹۸۲ میلادی توسط ونگ مطرح شد. در این مرحله مقدار خطای شدت جریان حجمی هر حلقه طبق رابطه (۶-۲) برآورد می‌شود. هدف از این تصحیح، حذف علامت مثبت یا منفی افت فشار در رابطه ۳-۲ و همچنین جهت جریان هوا در تمام شاخه‌های یک شبکه حتی با مقدار شدت جریان حجمی منفی بدون تغییر جهت، ثابت باقی می‌ماند. در حقیقت معادلات ۳-۲ و ۶-۲ برای شدت جریان‌های حجمی با مقدار مثبت کاملاً مشابه هم هستند (Wang, 1982a).

$$\Delta = - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} b_{ki} (R_i | Q_i | Q_i - P_{ni} - P_{Fi})}{2 \sum_{i=1}^{i=n} b_{ki}^2 R_i | Q_i |} \quad (6-2)$$

b_{ki} : عنصر ماتریس بنیادی حلقه است. اگر جهت جریان هوا در شاخه‌ای با جهت جریان حلقه هم جهت باشد در این صورت این عنصر معادل ۱ در غیر این صورت معادل ۱- در رابطه (۴-۲) ظاهر می‌شود.

P_{ni} : افزایش فشار ناشی از تهویه طبیعی در شاخه مورد نظر

P_{Fi} : افزایش فشار ناشی از بادبزن نصب شده در شاخه مورد نظر

تحقیقات انجام شده بر روی این روش بیانگر این مطلب است که این روش سبب کاهش تکرار محاسبات ریاضی برای همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی نمی‌شود (الهی، ۱۳۹۳ ب).

۲-۲-۳- روش هاردی کراس اصلاح شدهی حلقه فضایی

روش حلقه فضایی توسط برکیک^۱ در سال ۲۰۰۹ میلادی مطرح شد. هدف برکیک در این روش کاهش تعداد حلقه‌های شبکه تهویه در مرحله دوم از مراحل حل روش هاردی کراس است که می‌تواند سبب کاهش تکرار محاسبات شود. ایشان در این روش معتقد است که می‌توان حلقه‌های مفید در یک شبکه را در هم ترکیب کرد و یک حلقه بزرگ‌تر ایجاد کرد. طبق روش حلقه فضایی می‌توان هر ۴ حلقه مفید در یک شبکه را با ۳ حلقه بزرگ‌تر جایگزین کرد (Brkic, 2009). بنابراین این روش برای شبکه‌های تهویه که بیش از ۳ حلقه مفید دارند کارآمدتر خواهد بود و از نظر تکرار محاسبات سریع‌تر به جواب نهایی خواهد رسید ولی برای شبکه‌های تهویه با کمتر از ۴ حلقه مفید سبب کاهش تکرار محاسبات در روش هاردی کراس نمی‌شود.

۲-۲-۴- روش هاردی کراس اصلاح شدهی افرائی و مدنی

این تصحیح مربوط به مرحله چهارم از مراحل حل روش هاردی کراس که در سال ۱۳۹۱ (۲۰۱۳ میلادی) توسط افرائی و مدنی مطرح شد. طبق نظر افرائی و مدنی در صورتی که شدت جریان حجمی شاخه‌ای پس از جمع جبری با خطای حلقه‌های مربوط به آن طبق رابطه (۲-۳) منفی شود در این صورت اولاً جهت جریان در شاخه مذکور نباید تغییر کند و دیگر آن که شدت جریان حجمی آن شاخه در محاسبه خطای حلقه‌ها در تکرار بعد با علامت جبری خود در مخرج رابطه ۲-۳ در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر در صورتی که شدت جریان حجمی یک شاخه منفی شود در این صورت رابطه شدت جریان حجمی در مخرج با علامت منفی لحاظ شده اما جهت جریان تغییر نمی‌کند. این حالت همان حالتی است که منجر به دستیابی سریع به پاسخ صحیح می‌شود (افرائی و مدنی، ۱۳۹۱). تحقیقات انجام شده بر روی این روش بیانگر این مطلب است که این روش در بعضی

¹ Brkic

از مدل‌ها دچار واگرایی می‌شود (الهی، ۱۳۹۳ ب).

۲-۲-۵- روش تلفیقی هاردی کراس

این روش توسط الهی در سال ۱۳۹۳ مطرح شد. مدل‌های اصلاح شده مختلفی جهت همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی برای روش هاردی کراس ارائه شده که هر یک از آن‌ها از مزایا و معایب خاص خود برخوردار است. در اکثر مدل‌های اصلاح شده تصحیحات انجام شده مربوط به مراحل چهارم و پنجم از مراحل حل روش هاردی کراس است. در تمام مدل‌های اصلاح شده این دو مرحله جدا از هم بررسی و محاسبه می‌شوند یعنی پس از اتمام عملیات مرحله چهارم، عملیات مرحله پنجم شروع می‌شود که این امر یکی از معایب دسترسی سریع‌تر به جواب نهایی است. روش تلفیقی هاردی کراس بر اساس حل توام و گام به گام مراحل چهارم و پنجم استوار است به عبارت دیگر بعد از محاسبه خطای حلقه اول، باید عملیات تصحیح شدت جریان حجمی شاخه‌های مربوطه انجام شود و سپس خطای حلقه دوم برآورد شود. (الهی، ۱۳۹۳ ب).

۲-۲-۶- روش نیوتنی هاردی کراس

یکی از روش‌های هاردی کراس اصلاح شده در شبکه‌های توزیع آب، روش نیوتنی هاردی کراس است که توسط موسویان و جعفرزاده ارائه شده است. این روش طبق روابط ۷-۲ تا ۱۱-۲ انجام می‌شود (Moosavian and Jaefarzadeh, 2014b). طبق روش نیوتنی هاردی کراس، مخرج کسر در رابطه ۷-۲ باید همواره مثبت باشد. همچنین این روش برای شبکه‌هایی که دبی حجمی تعدادی از شاخه‌های آن ثابت باشد کارآمدتر است.

$$\Delta Q^{(t)} = -\frac{M_{31}A_{11}^{(t)}\text{diag}(Q^{(t)})}{M_{31}D_{11}^{(t)}} \quad (7-2)$$

$$M_{13}(k, L) = \begin{cases} +1 & \text{if the flow of pipe } k \text{ in loop } L \text{ is clockwise} \\ 0 & \text{if pipe } k \text{ is not in loop } L \\ -1 & \text{if the flow of pipe } k \text{ in loop } L \text{ is counterclockwise} \end{cases} \quad (8-2)$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} R_1 |Q_1|^{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 |Q_2|^{n-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{NP} |Q_{NP}|^{n-1} \end{bmatrix} \quad (9-2)$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} nR_1 |Q_1|^{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & nR_{NP} |Q_{NP}|^{n-1} \end{bmatrix} \quad (10-2)$$

$$Q^{(t+1)} = Q^{(t)} + M_{13} \Delta Q^{(t)} \quad (11-2)$$

در این مدل، رابطه ۷-۲ تقریباً مشابه رابطه ۶-۲ از معادله اصلاح شده مدل ونگ بدون تعریف فشار استاتیکی فن و فشار تهویه طبیعی است. بنابراین این عیب سبب می‌شود تا رابطه ۷-۲ در خصوص طراحی تهویه معادن به درستی عمل نکند.

۲-۷-۲- روش مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس

یکی دیگر از روش‌های هاردی کراس اصلاح شده در شبکه‌های توزیع آب، روش مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس است که توسط موسویان و جعفرزاده ارائه شده است. این روش طبق روابط ۱۲-۲ تا ۱۶-۲ برآورد می‌شود (Darvishi and Barati, 2007, Moosavian and Jaefarzadeh, 2014b). در این روش، رابطه ۱۲-۲ باید همواره مثبت باشد. همچنین این روش برای شبکه‌هایی که دبی حجمی تعدادی از شاخه‌های آن ثابت باشد کارآمدتر است.

$$M_1 = M_{31} D_{11}^{(t)} \quad (12-2)$$

$$M_2 = M_{31} A_{11}^{(t)} \text{diag}(Q^{(t)}) \quad (13-2)$$

$$y^{(t)} = Q^{(t)} - M_{13} \frac{M_2}{M_1} \quad (14-2)$$

$$M_3 = M_{31} A_{11}'^{(t)} \text{diag}(y^{(t)}) \quad (15-2)$$

$$Q^{(t+1)} = Q^{(t)} - M_{13} \frac{M_2 + M_3}{M_1} \quad (16-2)$$

در این مدل، رابطه ۱۴-۲ تقریباً مشابه رابطه ۶-۲ از معادله اصلاح شده مدل ونگ است ولی بدون تعریف فشار استاتیکی فن و فشار تهویه طبیعی. بنابراین این عیب سبب می‌شود تا رابطه ۱۶-۲ در خصوص طراحی تهویه معادن به درستی عمل نکند.

۲-۸-۲- روش مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس

یکی دیگر از روش‌های هاردی کراس اصلاح شده در شبکه‌های توزیع آب، روش مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس است که توسط موسویان و جعفرزاده ارائه شده است. طبق روابط ۱۲-۲ تا ۱۵-۲ و ۱۷-۲ تا ۲۲-۲ برآورد می‌شود (Li, et al., 2010, Moosavian and Jaefarzadeh, 2014b). در این روش، روابط ۱۲-۲ و ۱۸-۲ باید همواره مثبت باشد. همچنین این روش برای شبکه‌هایی که دبی حجمی تعدادی از شاخه‌های آن ثابت باشد کارآمدتر است از طرفی طراحان این روش مدعی هستند که این روش به عنوان یکی از سریع‌ترین روش‌های هاردی کراس اصلاح شده است.

$$z^{(t)} = y^{(t)} - M_{13} \left(\frac{M_3(2M_2 - M_3)/(2M_2 - 5M_3)}{M_1} \right) \quad (17-2)$$

$$M_4 = M_{31} D_{11}''^{(t)} \quad (18-2)$$

$$M_5 = M_{31} A_{11}''^{(t)} \text{diag}(z^{(t)}) \quad (19-2)$$

$$x^{(t)} = z^{(t)} - M_{13} \frac{M_5}{M_4} \quad (20-2)$$

$$M_6 = M_{31} A_{11}'''^{(t)} \text{diag}(x^{(t)}) \quad (21-2)$$

$$Q^{(t+1)} = x^{(t)} - M_{13} \left(\frac{M_6(2M_5 - M_6)/(2M_5 - 5M_6)}{M_4} \right) \quad (22-2)$$

این مدل نیز کاملاً مشابه بخش ۷-۲-۲ به دلیل عدم تعریف فشار استاتیکی فن و فشار تهویه طبیعی باعث می‌شود تا رابطه ۲۲-۲ در طراحی تهویه معادن به درستی عمل نکند.

۲-۲-۹- روش نیوتن - رافسون

یکی از روش‌های حل معادلات غیر خطی در محاسبات عددی استفاده از روش نیوتن - رافسون است. این روش بر پایه تعریف مشتق و تصحیح آن استوار است. در این روش مقدار خطای حدس اولیه برای حل معادله برآورد و سپس نسبت به تصحیح حدس اولیه اقدام می‌شود (الهی، ۱۳۹۳ الف، مدنی و ملکی، ۱۳۸۶، Wang, 1989). معادلات ریاضی این روش به شرح ذیل و طبق روابط ۲-۲۳ تا ۲-۲۸ می‌باشد.

الف- تعریف مشتق از نظر علم ریاضی

$$f'(x) = \lim_{x_2 \rightarrow x_1} \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \quad (2-23)$$

ب- مشتق اصلاح شده برای روش نیوتن - رافسون

$$f'(x) = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}$$

$$x_2 - x_1 = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{f'(x)}$$

$$f(x_2) = 0 \rightarrow x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad (2-24)$$

ج- همگرایی سریع تر روش نیوتن - رافسون به جواب نهایی

$$x_2 = x_1 - m \frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad (2-25)$$

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1) \times f'(x_1)}{[f'(x_1)]^2 - f(x_1) \times f''(x_1)} \quad (2-26)$$

لازم به ذکر است که روابط ۲-۲۵ و ۲-۲۶ برای معادلات با درجه بیش از ۲ کارایی بیشتری

دارد.

د- شبیه‌سازی معادله شدت جریان حجمی شاخه‌های شبکه تهویه از مدل ونگ در روش نیوتن -

رافسون

$$f_n = f(H_n) = f(\Delta P_n) = f(R_n Q_n^2)$$

$$\Delta Q_{n+1} = \Delta Q_n - \frac{f(H_n)}{\frac{\partial f_n}{\partial \Delta Q}} \quad (27-2)$$

ه- شبیه سازی معادله افت فشار شاخه های شبکه تهویه از مدل ونگ در روش نیوتن- رافسون

$$f_n = f(H_n) = f(\Delta P_n) = f(R_n Q_n^2)$$

$$H_{n+1} = H_n - \frac{f(H_n)}{\frac{\partial f_n}{\partial H}} \quad (28-2)$$

x_1 : حدس اولیه

x_2 : جواب مرحله بعد

$f(x_1)$: مقدار تابع براساس حدس اولیه

$f(x_2)$: مقدار تابع براساس جواب نهایی (معادل صفر)

$f'(x_1)$: مقدار مشتق اول تابع

$f''(x_1)$: مقدار مشتق دوم تابع

m : بالاترین درجه متغیر در مشتق اول

مراحل تحلیل معادلات شدت جریان حجمی شاخه ها و افت فشار شاخه ها در شبکه تهویه

معادن با استفاده از روش نیوتن- رافسون اصلاح شده ونگ، طبق روابط ۲-۱۳ تا ۲-۱۶ می باشد.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_L \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_L \end{bmatrix}^n - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \Delta Q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta Q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta Q_L} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta Q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta Q_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta Q_L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_L}{\partial \Delta Q_1} & \frac{\partial f_L}{\partial \Delta Q_2} & \dots & \frac{\partial f_L}{\partial \Delta Q_L} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_L \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_L \end{bmatrix}^n - \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_L \end{bmatrix}^n \quad (29-2)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \Delta Q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta Q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \Delta Q_L} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Delta Q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta Q_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \Delta Q_L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_L}{\partial \Delta Q_1} & \frac{\partial f_L}{\partial \Delta Q_2} & \dots & \frac{\partial f_L}{\partial \Delta Q_L} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_L \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_L \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_L \end{bmatrix}^n - \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_L \end{bmatrix}^n \quad (30-2)$$

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_L \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_L \end{bmatrix}^n - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial H_1} & \frac{\partial f_1}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial H_L} \\ \frac{\partial f_2}{\partial H_1} & \frac{\partial f_2}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial H_L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_L}{\partial H_1} & \frac{\partial f_L}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial f_L}{\partial H_L} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_L \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_L \end{bmatrix}^n - \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_L \end{bmatrix}^n \quad (31-2)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial H_1} & \frac{\partial f_1}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial H_L} \\ \frac{\partial f_2}{\partial H_1} & \frac{\partial f_2}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial H_L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_L}{\partial H_1} & \frac{\partial f_L}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial f_L}{\partial H_L} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_L \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_L \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_L \end{bmatrix}^n - \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_L \end{bmatrix}^n \quad (32-2)$$

در روش نیوتن-رافسون اصلاح شده ونگ برای حل معادلات شدت جریان حجمی شاخه‌ها بر اساس رابطه ۳۰-۲ باید مراحل ذیل دنبال شود:

مرحله اول: با توجه به قانون گره‌ها یک شدت جریان حجمی فرضی با جهت فرضی ثابت برای

هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه در نظر گرفته می‌شود.

مرحله دوم: شناسایی حلقه‌های مفید در شبکه تهویه طبق رابطه ۴-۲ و انتخاب یک جهت

فرضی برای همه‌ی آن‌ها

مرحله سوم: برآورد معادله ۲-۳۰ و تصحیح شدت جریان حجمی هر یک از شاخه‌های شبکه

تهویه

مرحله چهارم: تکرار عملیات فوق از مرحله سوم، تا مادامی که خطای محاسبات کمتر یا مساوی

دقت انجام محاسبات شود.

تحقیقات انجام شده بر روی این روش بیانگر این مطلب است که این روش در بعضی از مدل‌ها

دچار واگرایی می‌شود (الهی، ۱۳۹۳ الف).

۲-۱۰- روش نیوتن - رافسون با جهت‌های متغیر

جهت همگرایی روش نیوتن - رافسون مدل ونگ، روش نیوتن - رافسون با جهت‌های متغیر

توسط الهی ارائه شد (الهی، ۱۳۹۸). این روش مشابه روش قبلی است ولی دو تصحیح به مرحله سوم

از روش نیوتن - رافسون مدل ونگ اضافه شد. این تصحیحات به شرح ذیل بیان می‌شوند:

تصحیح اول، در صورت مواجهه با مقدار Q منفی در هر شاخه از شبکه تهویه لازم است جهت

جریان هوا در آن شاخه معکوس شود.

تصحیح دوم، معادلات شدت جریان حجمی شاخه‌ها (ΔQ) (روابط ۲-۲۹ و ۲-۳۰) بر اساس

جهت جریان‌های جدید هوا باید تصحیح شوند.

۲-۱۱- جمع‌بندی طراحی تهویه در مدل تراکم‌ناپذیری

رایج‌ترین روش تقریبی ریاضی برای تحلیل شبکه تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری، روش

هاردی کراس است. روش هاردی کراس براساس جهت جریان‌های متغیر استوار است. هر چند این

روش براساس شبکه‌های توزیع آب ارائه شده و انطباق کامل با شبکه‌های تهویه معادن ندارد بر این

اساس روش اصلاح شده ونگ برای تحلیل دقیق‌تر شبکه‌های تهویه معادن ارائه شد. در مدل اصلاح

شده ونگ جهت جریان‌های فرضی در شبکه تهویه تا پایان محاسبات ریاضی بدون تغییر جهت و ثابت

باقی می‌ماند ولی سبب همگرایی سریع‌تر از نظر تکرار انجام محاسبات ریاضی به جواب نهایی نمی‌شود. برای همگرایی سریع‌تر روش هاردی کراس به جواب نهایی، روش حلقه فضایی مطرح شد. در روش حلقه فضایی با تعریف حلقه‌های مفید بزرگ‌تر توانسته است سبب همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی شود ولی این روش برای شبکه‌های حجیم از کارآیی بیشتری برخوردار است. از روش‌های اصلاح شده دیگر، روش هاردی کراس مدل اصلاح شده افزایی و مدنی است این تصحیح مربوط به شدت جریان حجمی منفی در مخرج کسر روش هاردی کراس است اما با فرض جهت جریان‌های ثابت که با شبکه‌های توزیع آب هماهنگی کامل‌تری دارد. نتایج حاصل شده از تحقیقات دیگران در خصوص مدل افزائی و مدنی بیانگر عدم همگرایی به جواب نهایی برای برخی از شبکه‌های تهویه معادن است. در روش تلفیقی هاردی کراس با حل توام مراحل چهارم و پنجم از روش هاردی کراس سبب همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی در شبکه تهویه معادن شده است. این روش برپایه جهت‌های جریان متغیر استوار است. این روش توانسته است تعداد تکرار محاسبات ریاضی را نسبت به روش هاردی کراس تا ۴۲٪ کاهش دهد. بنابراین بر اساس روش تلفیقی هاردی کراس می‌توان اصلاحات بعدی را انجام داد تا تعداد تکرار محاسبات ریاضی باز هم کاهش یابد.

در پروژه‌های عمرانی برای توزیع شبکه‌های آب از روش هاردی کراس و مدل‌های اصلاح شده آن به طور مکرر استفاده شده است که روش‌های نیوتنی نمونه‌ای از آن‌هاست. این روش‌ها برپایه اصول ماتریس‌ها استوار بوده و برای شبکه‌هایی با شدت جریان حجمی ثابت از کارآیی بیشتری برخوردار هستند. در بین مدل‌های نیوتنی، طراحان مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس با تعریف ۱۰ معادله ریاضی مدعی هستند که این روش به عنوان یکی از سریع‌ترین روش‌های اصلاح شده هاردی کراس است. بر این اساس در این رساله این روش مورد اهمیت قرار گرفته است ولی این روش با اصول طراحی تهویه در معادن سازگاری کامل ندارد و نیازمند تصحیح است.

یکی دیگر از روش‌های تقریبی ریاضی در تحلیل شبکه تهویه معادن، روش نیوتن-رافسون اصلاح شده ونگ است. مطابق بخش ۲-۲-۹، حجم محاسبات ریاضی این روش در تحلیل شبکه‌های

تهویه بیش‌تر از روش هاردی کراس است از این جهت این روش هنوز از محبوبیت کافی در بین کاربران برخوردار نشده است. همچنین در روش نیوتن-رافسون مدل ونگ جهت جریان‌های فرضی در شبکه تهویه تا پایان محاسبات ریاضی بدون تغییر جهت و ثابت باقی می‌ماند ولی این روش مطابق مطالعات انجام شده برای برخی از شبکه‌های تهویه برای رسیدن به جواب نهایی به سمت عدم همگرایی پیش می‌رود. بنابراین اصلاح این روش به سمت همگرا شدن، امری ضروری در تحلیل شبکه تهویه معادن است. بر این اساس طبق بخش ۲-۲-۱۰، روش نیوتن-رافسون با جهت‌های متغیر توانسته است مساله واگرایی در روش نیوتن-رافسون مدل ونگ را برطرف نماید ولی از سهولت کاربرد کافی برخوردار نیست. بنابراین تصحیح این روش برای سهولت کاربرد در طراحی تهویه معادن امری ضروری است.

۲-۳-۲- مروری بر طراحی تهویه با استفاده از مدل تراکم‌پذیر بودن سیال هوا

اگر عمق معدن کاری نسبت به بالاترین خط تراز توپوگرافی آن بیشتر از ۵۰۰ متر باشد در این صورت محققین معتقدند سیال هوا برای تهویه این معادن بهتر است از نوع سیال تراکم پذیر فرض شود. در این مدل با توجه به وجود یا عدم وجود بخار آب، طراحی تهویه در دو مدل تراکم‌پذیر خشک یا مرطوب تفسیر می‌شود. همچنین محاسبات تهویه در معادن بر پایه فرضیاتی انجام می‌شود که این فرضیات شامل دما و فشار هوا در سطح آب‌های آزاد به ترتیب معادل ۱۵ درجه سانتیگراد و ۷۶۰ میلیمتر جیوه یا ۱۰۱۳۲۵ پاسکال یا ۱۰۳۳۲/۳ میلیمتر آب و شتاب ثقل زمین معادل ۹/۸۰۶۶۵ متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته می‌شود (مدنی، ۱۳۸۲، McPherson, 1993, Hall, 1998).

۲-۳-۱- طراحی تهویه با استفاده از مدل هوای خشک تراکم‌پذیر

اگر در این مدل از تهویه، مساله بخار آب در نظر گرفته نشود در این صورت هوای داخل معدن خشک فرض می‌شود. بنابراین برای طراحی تهویه معادن با فرض هوای خشک تراکم پذیر غالباً از روش تحلیل ترمودینامیکی انجام می‌شود. در این معادلات، مسائل گرما بدون مسائل رطوبت در

حفریات معدنی منظور می‌شود. معادلات ترمودینامیکی این تئوری در روابط ۲-۳۳ تا ۲-۴۱ ارائه شده

است (مدنی، ۱۳۸۲، McPherson, 1993, Hall, 1998).

$$P = \rho R_d T \quad (۲-۳۳)$$

$$-\Delta_{ep} - \Delta_{ek} + W_{12} = \int V dP + F_{12} = h_{12} - q_{12} \quad (۲-۳۴)$$

$$\Delta_{ep} = g(Z_2 - Z_1) \quad (۲-۳۵)$$

$$\Delta_{ek} = \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) \quad (۲-۳۶)$$

$$\int V dP = R_d(t_{d2} - t_{d1}) \frac{k}{k-1} \quad (۲-۳۷)$$

$$k = \frac{F_{12} + \Delta_{ep} + \Delta_{ek} - W_{12}}{F_{12} + \Delta_{ep} + \Delta_{ek} - W_{12} + R_d(t_{d2} - t_{d1})} \quad (۲-۳۸)$$

$$F_{12} = \frac{f}{2} \frac{LP}{S} V^2 \quad (۲-۳۹)$$

$$h_{12} = c_p(t_{d2} - t_{d1}) \quad (۲-۴۰)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{273.15 + t_{d2}}{273.15 + t_{d1}} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (۲-۴۱)$$

P : فشار کل هوا (پاسکال)

T : دمای هوای خشک (کلوین)

Δ_{ep} : تغییرات انرژی پتانسیل (ژول بر کیلوگرم)

Δ_{ek} : تغییرات انرژی جنبشی (ژول بر کیلوگرم)

W_{12} : قدرت بادبزن (ژول بر کیلوگرم)

F_{12} : اصطکاک کار معدنی (ژول بر کیلوگرم)

q_{12} : مقدار گرما بین دو ایستگاه (ژول بر کیلوگرم)

R_d : ضریب ثابت هوای خشک معادل ۲۸۷/۰۴ (ژول بر کیلوگرم درجه کلوین)

t_{d1} : دمای هوای خشک در ایستگاه ۱ (سانتیگراد)

t_{d2} : دمای هوای خشک در ایستگاه ۲ (سانتیگراد)

C_p : ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت معادل ۱۰۰۵ (ژول بر کیلوگرم درجه کلوین)

۲-۳-۲- طراحی تهویه با استفاده از مدل هوای مرطوب تراکم‌پذیر

اگر در این مدل از تهویه، مساله بخار آب در نظر گرفته شود در این صورت هوای داخل معدن مرطوب فرض می‌شود. بنابراین برای طراحی تهویه معادن با فرض هوای مرطوب تراکم‌پذیر غالباً از روش تحلیل ترمودینامیکی انجام می‌شود. در این معادلات، مسائل گرما به همراه مسائل رطوبت در حفاریات معدنی منظور می‌شوند. معادلات ترمودینامیکی این تئوری در روابط ۲-۴۲ تا ۲-۶۳ ارائه شده است (مدنی، ۱۳۸۲، McPherson, 1993, Hall, 1998).

$$P = P_d + P_v \quad (۲-۴۲)$$

$$P_d = \rho_d R_d T \quad (۲-۴۳)$$

$$P_v = \rho_v R_v T = w \rho_d R_v T \quad (۲-۴۴)$$

$$\rho_d = \frac{P - P_v}{287.04 T} \quad (۲-۴۵)$$

$$\rho_m = \frac{P - 0.378 P_v}{287.04 T} \quad (۲-۴۶)$$

$$L = (25025 - 2.386 t_w) \times 10^3 \quad (۲-۴۷)$$

$$P_{vs} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27 t_w}{237.3 + t_w}\right) \quad (۲-۴۸)$$

$$w_s = \frac{0.622 P_{vs}}{P - P_{vs}} \quad (۲-۴۹)$$

$$w = \frac{L w_s - c_p (t_d - t_w)}{L + c_{pv} (t_d - t_w)} \quad (۲-۵۰)$$

$$P_v = \frac{P w}{0.622 + w} \quad (۲-۵۱)$$

$$P_{vsd} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27 t_d}{237.3 + t_d}\right) \quad (۲-۵۲)$$

$$R_h = \frac{P_v}{P_{vsd}} \quad (۲-۵۳)$$

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} = \int V dP + F_{12} = h_{12}^* - q_{12} \quad (۲-۵۴)$$

$$\Delta_{ep}^* = g(Z_2 - Z_1)(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}) \quad (55-2)$$

$$V_2 = \frac{\rho_{d1} V_1 S_1}{\rho_{d2} S_2} \quad (56-2)$$

$$\Delta_k^* = \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}) \quad (57-2)$$

$$\int V dP = (\frac{P_2}{\rho_{d2}} - \frac{P_1}{\rho_{d1}}) \frac{k}{k-1} \quad (58-2)$$

$$k = \frac{Ln(\frac{P_2}{P_1})}{Ln(\frac{\rho_{d2}}{\rho_{d1}})} \quad (59-2)$$

$$h_{12}^* = c_p(t_{d2} - t_{d1}) + w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w} \quad (60-2)$$

$$h_{v1} = (1.81t_{d1} - 2501) \times 1000 \quad (61-2)$$

$$h_{v2} = (1.81t_{d2} - 2501) \times 1000 \quad (62-2)$$

$$\overline{h_w} = 2100 \times (t_{d2} + t_{d1}) \quad (63-2)$$

P_d : فشار هوای خشک (پاسکال)

P_v : فشار بخار آب (پاسکال)

ρ_d : جرم حجمی هوای خشک (کیلوگرم بر متر مکعب)

ρ_m : جرم حجمی هوای مرطوب (کیلوگرم بر متر مکعب)

L : گرمای نهان تبخیر آب (ژول بر کیلوگرم)

P_{vs} : فشار بخار آب اشباع (پاسکال)

w_s : نسبت رطوبت اشباع هوا (کیلوگرم بر کیلوگرم)

w : نسبت رطوبت هوا (کیلوگرم بر کیلوگرم)

P_{vsd} : فشار بخار آب اشباع در دمای خشک هوا (پاسکال)

R_h : رطوبت نسبی هوا (درصد)

c_{pv} : ظرفیت گرمایی ویژه بخار آب در فشار ثابت معادل ۱۸۸۴ (ژول بر کیلوگرم درجه کلوین)

۲-۳-۳- جمع‌بندی طراحی تهویه در مدل تراکم‌پذیری

به طور معمول طراحی تهویه در معادن از دیدگاه سیال تراکم پذیر در دو مدل هوای خشک و مرطوب انجام می‌شود. در معادلات ترمودینامیکی حاکم در مدل خشک نیاز به حل تقریباً ۹ معادله ریاضی است که یک معادله آن غیر خطی است ولی از نظر علم ریاضی، جواب نهایی آن به سهولت برآورد می‌شود. در معادلات ترمودینامیکی حاکم در مدل مرطوب نیاز به حل تقریباً ۲۲ معادله ریاضی است. این معادلات مستقل از هم نبوده بلکه به هم وابسته‌اند بنابراین در صورت استفاده از روش‌های معمول علم ریاضی نیاز به حل دو معادله غیرخطی حجیم و وقت‌گیر است. بنابراین ارائه روش‌های ساده‌تر برای حل این معادلات غیرخطی در مدل هوای مرطوب امری ضروری در تهویه معادن است.

۲-۴-۲- مروری بر نرم‌افزارهای تهویه در معادن

نرم‌افزارهای متعددی برای طراحی تهویه در معادن ارائه شده‌اند که تعدادی از آن‌ها به شرح ذیل بیان می‌شوند:

۲-۴-۲-۱- نرم‌افزار MINVENT

این نرم‌افزار تهویه توسط ونگ براساس روش هاردی کراس در مدل تراکم‌ناپذیری بدون تحلیل مدل‌های گرمایی به زبان فورترن کدنویسی شد سپس توسط آوری^۱ به زبان بیسیک ترجمه و توسط هال تصحیح شد. این نرم‌افزار براساس سیستم آحاد انگلیسی کدنویسی شده و توسط مدنی به سیستم متریک تبدیل و تصحیح شد (مدنی، ۱۳۸۲) اما عدم تحلیل کامل مدل تراکم‌پذیری و بی‌بهره بودن از سایر روش‌های دیگر از محدودیت‌های این نرم‌افزار محسوب می‌شود.

۲-۴-۲-۲- نرم‌افزار AVENT

این نرم‌افزار تهویه در دانشگاه کیوشو^۲ ژاپن به زبان C کدنویسی شد و از قابلیت‌هایی همچون امکان نمایش گرافیکی شبکه تهویه، شبیه‌سازی حریق، بررسی تاثیرات تهویه طبیعی، تعریف منحنی

^۱ Avery
^۲ Kyushu

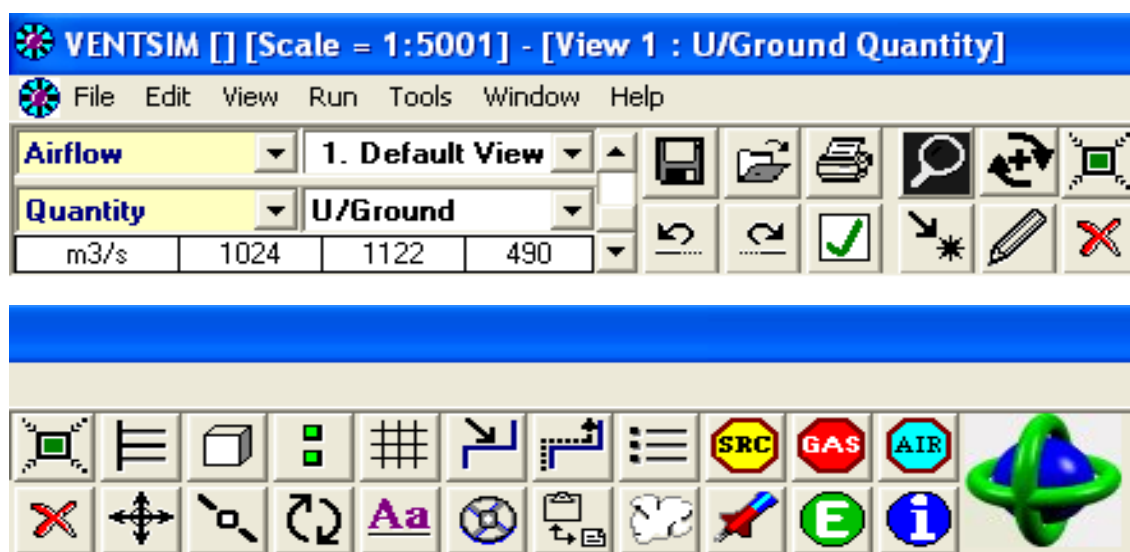
مشخصه بادبزن و شدت جریان‌های ثابت برای تحلیل شبکه‌های تهویه در مدل تراکم‌ناپذیری در این نرم‌افزار منظور شده است (مدنی، ۱۳۸۲) اما عدم تحلیل کامل مدل تراکم‌پذیری از محدودیت‌های این نرم‌افزار محسوب می‌شود.

۲-۴-۳- نرم‌افزار VNETPC

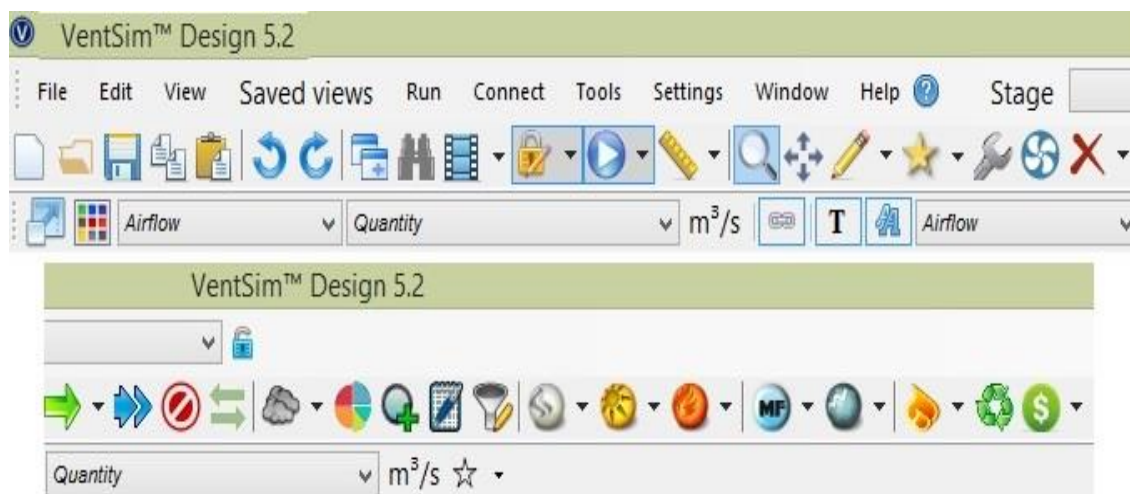
این نرم‌افزار تهویه توسط شرکت خدمات تهویه معدن امریکا ارائه شد و از قابلیت‌های همچون امکان نمایش گرافیکی شبکه تهویه، شبیه‌سازی نحوه توزیع گاز و تعریف منحنی مشخصه بادبزن برای تحلیل شبکه‌های تهویه در مدل تراکم‌ناپذیری منظور شده است (مدنی، ۱۳۸۲) اما عدم تحلیل کامل مدل تراکم‌پذیری از محدودیت‌های این نرم‌افزار محسوب می‌شود.

۲-۴-۴- نرم‌افزار VENTSIM

این نرم‌افزار یکی از رایج‌ترین نرم‌افزارهای طراحی تهویه معادن در اکثر کشورهای دنیا است. نرم‌افزار Ventsim قابلیت‌های بسیار زیادی در زمینه‌های مختلف همچون نمایش گرافیکی شبکه تهویه، شبیه‌سازی مسائل آتش‌سوزی به همراه نحوه توزیع گاز و دود در شبکه تهویه و با استفاده از تعریف منحنی مشخصه بادبزن قادر به طراحی شبکه‌های تهویه در مدل‌های تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری است. پنجره اصلی این نرم‌افزار در شکل‌های ۱-۲ و ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ پنجره اصلی نرم‌افزار Ventsim (3.9.3a)



شکل ۲-۲ پنجره اصلی نرم افزار Ventsim (5.2.6.8)

فصل سوم

روش‌های جدید طراحی تهویه در معادن

۳-۱- مقدمه

در فصل گذشته مروری بر انواع روش‌های تحلیل طراحی تهویه در معادن در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری انجام شد. در مدل تراکم‌ناپذیری روش‌هایی همچون روش هاردی کراس، هاردی کراس اصلاح شده ونگ، هاردی کراس اصلاح شده حلقه فضایی، هاردی کراس اصلاح شده افراپی و مدنی، مدل‌های نیوتنی هاردی کراس، مدل تلفیقی هاردی کراس، روش نیوتن-رافسون، نیوتن-رافسون اصلاح شده مدل ونگ، نیوتن-رافسون با جهت‌های متغیر با مزایا و معایب آن مطرح شد. در بین روش‌های مذکور، مدل تلفیقی روش هاردی کراس، روش مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس و روش نیوتن-رافسون با جهت‌های متغیر از اطمینان بیشتری برای حصول به جواب نهایی برخوردار هستند. در این فصل براساس روش‌های فوق، سه روش جدید برای طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری ارائه شده است. همچنین برای حل معادلات ترمودینامیکی حاکم در مدل هوای مرطوب نیاز به حل دو معادله غیرخطی حجم و وقت‌گیر است. بنابراین در این فصل روش‌های جدیدی برای حل ساده‌تر این معادلات غیرخطی در مدل هوای مرطوب ارائه می‌شود. همچنین برای تسریع انجام محاسبات ریاضی و کاهش خطای محاسبات انسانی یک برنامه رایانه‌ای تحت عنوان Ventilation Design در این فصل ارائه می‌شود.

۳-۲- روش کار

برای طراحی تهویه معادن برپایه تحلیل معادله اتکینسون طبق رابطه ۲-۲ در مدل تراکم‌ناپذیری مفاهیم جدیدی همچون شاخه‌های مشترک و غیرمشترک و حلقه مستقل که بدون

استفاده از مشتقات متوالی، روش‌های جدیدی با نام‌های دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس و روش نیوتن-رافسون بدون مشتق ارائه شده که در مرحله بعد با استفاده از معادلات موجود برای تحلیل مدل هوای مرطوب، روش‌های جدیدی با نام‌های روش دلتا (Δ)، روش K و روش K-W ارائه شده که موجب سهولت حل معادلات ترمودینامیکی شده تا نتایج مطلوبی حاصل شود. به طور کلی با اعمال محدودیت‌هایی در معادلات ریاضی تهویه سبب کاهش تعداد تکرار و زمان انجام محاسبات ریاضی و همچنین سبب همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری شده است.

۳-۳- روش‌های جدید طراحی تهویه در مدل تراکم‌ناپذیری

۳-۳-۱- دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس

با توجه به بخش ۲-۲، تصحیح اکثر مدل‌های اصلاح شده روش هاردی کراس مربوط به مراحل چهارم و پنجم از روش هاردی کراس است و در این مدل‌ها این دو مرحله مستقل یا وابسته به هم بررسی شده‌اند. هر یک از مدل‌های اصلاح شده توانسته‌اند تعداد تکرار محاسبات ریاضی و زمان انجام آن را کاهش دهند. بر این اساس سوالی مطرح می‌شود آیا می‌توان تعداد تکرار محاسبات ریاضی روش هاردی کراس را به همراه زمان انجام آن کاهش داد؟ برای پاسخ‌گویی به این سوال، دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس در این بخش ارائه می‌شود که مراحل آن به شرح ذیل و فلوچارت آن در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.

مرحله اول: با توجه به قانون گره‌ها یک شدت جریان حجمی فرضی با جهت فرضی برای هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه در نظر گرفته می‌شود.

مرحله دوم: شناسایی حلقه‌های مفید در شبکه تهویه طبق رابطه ۲-۴ و انتخاب یک جهت

فرضی برای آن‌ها

مرحله سوم: شناسایی شاخه‌های مشترک و غیرمشترک در بین حلقه‌های مفید

مرحله چهارم: تشکیل حلقه مستقل براساس شاخه‌های غیرمشترک و محاسبه مقدار خطای شدت جریان حجمی حلقه مستقل براساس روابط ۱-۳ تا ۳-۳. لازم به ذکر است اگر جهت جریان هوا در شاخه‌ای با جهت جریان حلقه هم جهت باشد در این صورت افت فشار آن شاخه با علامت مثبت در غیر این صورت با علامت منفی در صورت معادله ظاهر می‌شود. همچنین مخرج کسر در معادله ۱-۳ بدون تعیین علامت آن همواره از علامت مثبت برخوردار خواهد بود.

$$\Delta Q = - \frac{\sum \pm R_i Q_i^2 - \sum (P_{i-Fan} + P_{i-Natural})}{2 \sum R_i Q_i} \quad (\text{برای جهت‌های متغیر}) \quad (1-3)$$

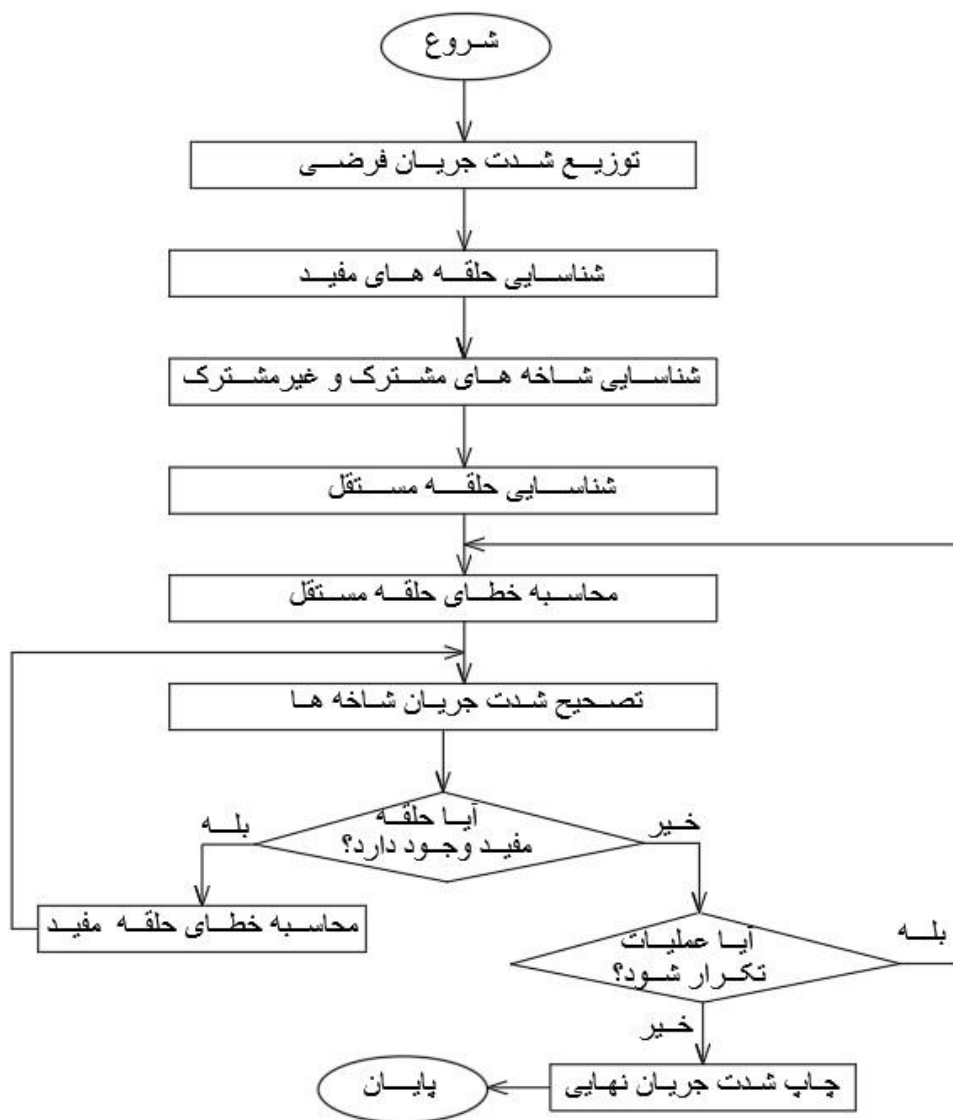
$$\Delta Q = - \frac{\sum \pm R_i |Q_i| Q_i - \sum (P_{i-Fan} + P_{i-Natural})}{2 \sum R_i |Q_i|} \quad (\text{برای جهت‌های ثابت}) \quad (2-3)$$

$$Q'_i = Q_i + \sum \pm \Delta Q_j \quad (3-3)$$

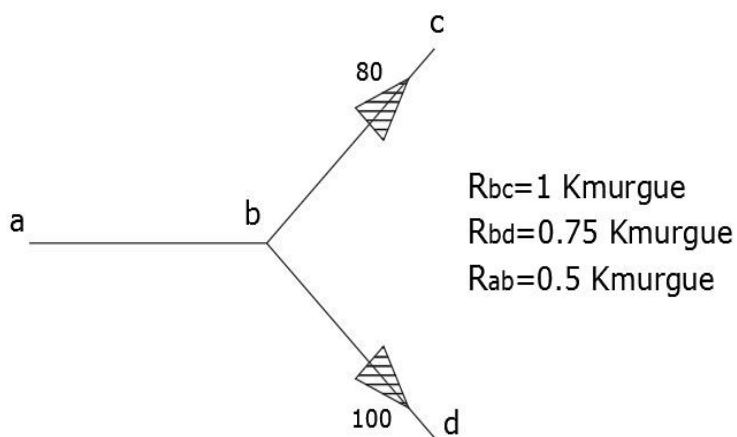
مرحله پنجم: محاسبه مقدار خطای شدت جریان حجمی اولین حلقه مفید و بررسی تاثیر آن بر شاخه‌های شبکه تهویه طبق روابط ۱-۳ تا ۳-۳. همچنین محاسبه مقدار خطای شدت جریان حجمی سایر حلقه‌های مفید و بررسی تاثیر آن بر شاخه‌های شبکه تهویه با رعایت ترتیب شماره آن‌ها.

مرحله ششم: عملیات فوق از مرحله چهارم و پنجم باید چندین بار تکرار شود تا خطای محاسبات کمتر یا مساوی دقت انجام محاسبات شود.

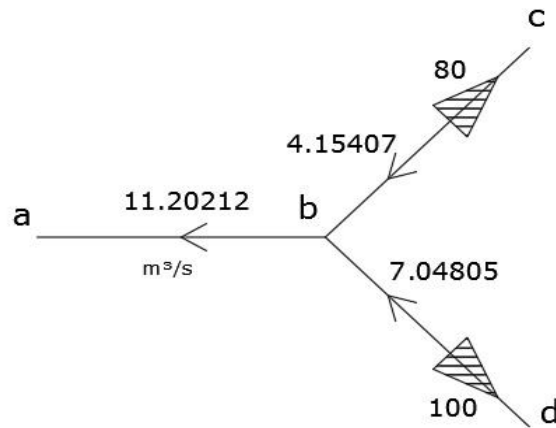
برای درک بهتر دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس از شبکه تهویه فرضی یک فضای زیرزمینی مطابق شکل ۲-۳ استفاده می‌شود که از دو بادبزن با فشار تولیدی ۱۰۰ و ۸۰ میلیمتر آب تشکیل شده است. این مدل فرضی از سه گره سطحی (a, c, d) و یک گره زیرزمینی (b) تشکیل شده است. ابتدا این شبکه توسط نرم‌افزار Ventsim که به عنوان رایج‌ترین نرم‌افزار تحلیل شبکه تهویه معادن شناخته شده، شبیه‌سازی و سپس نتایج آن با دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس مقایسه شده است. نتیجه شبیه‌سازی نرم‌افزار Ventsim برای توزیع شدت جریان هر یک از شاخه‌های شبکه مذکور در شکل ۳-۳ ارائه شده است.



شکل ۳-۱ فلوچارت دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس



شکل ۳-۲ شبکه تهویه فرضی



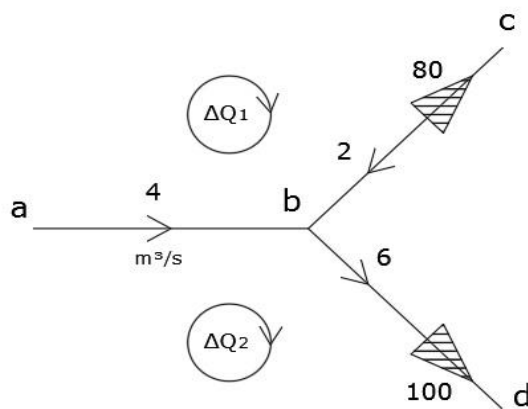
شکل ۳-۳ توزیع شدت جریان حجمی هوا توسط نرم افزار Ventsim

مراحل حل دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس به شرح ذیل بیان می شود:

مرحله اول: توزیع شدت جریان حجمی فرضی با جهت های فرضی درون شبکه تهویه مطابق

شکل ۳-۳.

مرحله دوم: شناسایی حلقه های مفید درون شبکه تهویه مطابق شکل ۳-۴.



شکل ۳-۴ شدت جریان های حجمی فرضی

مرحله سوم: شناسایی شاخه های مشترک و غیر مشترک در بین حلقه های مفید است. بر این

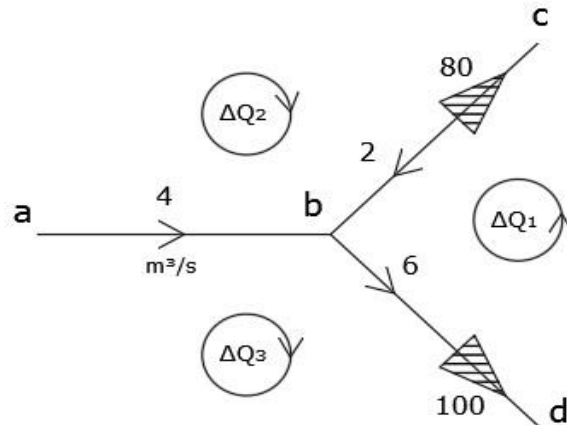
اساس با توجه به شکل ۳-۴ مشاهده می شود که در این شکل ۲ حلقه مفید وجود دارد. طبق این

شکل، شاخه ab به عنوان شاخه مشترک و شاخه های bc و bd به عنوان شاخه های غیرمشترک

شناخته می شوند.

مرحله چهارم: تشکیل حلقه مستقل بر اساس شاخه های غیر مشترک و محاسبه مقدار خطای

شدت جریان حجمی حلقه مستقل است. بر این اساس حلقه مستقل، شاخه‌های bc و bd را تحت پوشش می‌گیرد. بنابراین طبق شکل ۵-۳ این شبکه از یک حلقه مستقل و دو حلقه مفید تشکیل شده است. عملکرد حلقه مستقل به شرح ذیل و نتایج آن در شکل ۶-۳ نشان داده شده است.

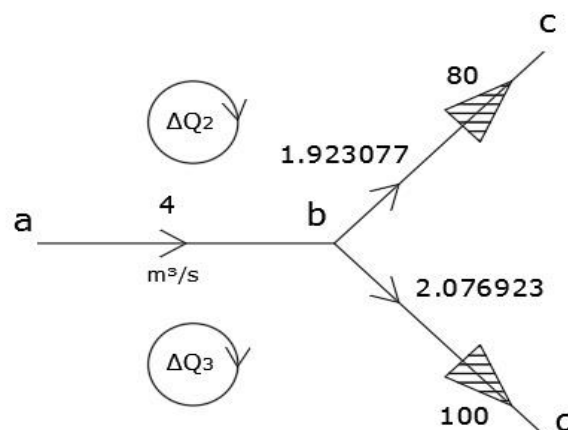


شکل ۵-۳ شناسایی حلقه‌های مستقل و مفید در شبکه تهویه فرضی

$$\delta Q_1 = -\frac{1 \times 2^2 + 0.75 \times 6^2 + 100 - 80}{2(1 \times 2 + 0.75 \times 6)} = -3.923077$$

$$Q'_{bc} = Q_{bc} + \delta Q_1 = 2 - 3.923077 \rightarrow Q'_{bc} = -1.923077 \frac{m^3}{s}$$

$$Q'_{bd} = Q_{bd} + \delta Q_1 = 6 - 3.923077 \rightarrow Q'_{bd} = 2.076923 \frac{m^3}{s}$$



شکل ۶-۳ نتیجه عملکرد اولین تکرار از حلقه مستقل در دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس

مرحله پنجم: محاسبه مقدار خطای شدت جریان حجمی سایر حلقه‌های مفید و بررسی تاثیر

آنها بر شاخه‌های شبکه تهویه است که عملکرد آنها به شرح ذیل و نتایج آنها در شکل‌های ۳-۷ و ۳-۸ نشان داده شده است.

$$\delta Q_2 = -\frac{-1 \times 1.923077^2 - 0.5 \times 4^2 - 80}{2 \times (1 \times 1.923077 + 0.5 \times 4)} = 11.687029$$

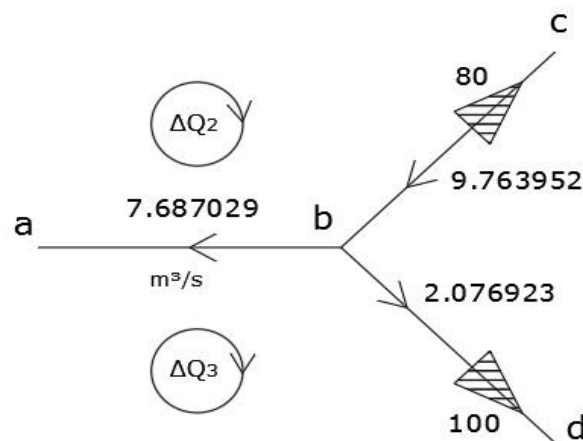
$$Q'_{bc} = Q_{bc} - \delta Q_2 = 1.923077 - 11.687029 \rightarrow Q'_{bc} = -9.763952 \frac{m^3}{s}$$

$$Q'_{ab} = Q_{ab} - \delta Q_2 = 4 - 11.687029 \rightarrow Q'_{ab} = -7.687029 \frac{m^3}{s}$$

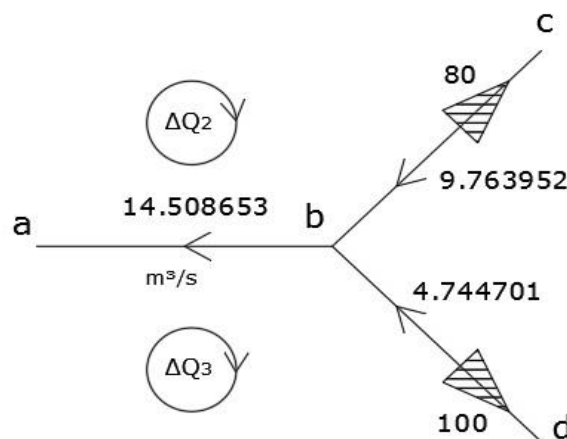
$$\delta Q_3 = -\frac{-0.5 \times 7.687029^2 + 0.75 \times 2.076923^2 + 100}{2 \times (0.5 \times 7.687029 + 0.75 \times 2.076923)} = -6.821624$$

$$Q'_{ab} = Q_{ab} - \delta Q_3 = 7.687029 + 6.821624 \rightarrow Q'_{ab} = 14.508653 \frac{m^3}{s}$$

$$Q'_{bd} = Q_{bd} + \delta Q_3 = 2.076923 - 6.821624 \rightarrow Q'_{bd} = -4.744701 \frac{m^3}{s}$$



شکل ۳-۷ نتیجه عملکرد اولین تکرار از اولین حلقه مفید در دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس



شکل ۳-۸ نتیجه عملکرد اولین تکرار از دومین حلقه مفید در دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس

مرحله ششم: نتایج سایر مراحل تکرار است که نتایج آن توسط برنامه رایانه‌ای Ventilation Design که شرح آن در بخش ۳-۵ بیان می‌شود مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج در جدول ۳-۱ نشان داده شده است. اگر دقت انجام محاسبات برابر 10^{-5} فرض شود در این صورت تعداد تکرار انجام محاسبات ریاضی در این روش برابر ۸ تکرار می‌شود ولی اگر همین شبکه تهویه فرضی توسط روش هاردی کراس اجرا شود بعد از ۲۴ تکرار انجام محاسبات به همین جواب نهایی خواهد رسید. نتایج حاصل شده از نرم‌افزار Ventsim در شکل ۳-۳ و جدول ۳-۱ توسط برنامه رایانه‌ای Ventilation Design کاملاً یکسان است. بنابراین دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس توانسته است ۶۷ درصد تعداد تکرار محاسبات روش هاردی کراس را در این مدل فرضی کاهش دهد.

جدول ۳-۱ نتایج دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس توسط Ventilation Design

ردیف	شرح	Q_{bc}	Q_{ab}	Q_{bd}	ΔQ_1	ΔQ_2	ΔQ_3
۱	تکرار ۱	۹/۷۶۳۹۵۲	۱۴/۵۰۸۶۵۳	-۴/۷۴۴۷۰۱	-۳/۹۲۳۰۷۷	۱۱/۶۸۷۰۲۹	-۶/۸۲۱۶۲۴
۲	تکرار ۲	۳/۷۳۹۱۶۲	۱۱/۰۶۸۳۲۴	۷/۳۲۹۱۶۲	-۳/۶۹۴۹۰۶	-۲/۳۲۹۸۸۴	۱/۱۱۰۴۴۵
۳	تکرار ۳	۴/۱۸۹۵۰۸	۱۱/۲۱۹۴۱۰	۷/۰۲۹۹۰۲	۰/۳۴۱۳۸۸	۰/۱۰۸۹۵۹	-۰/۰۴۲۱۲۷
۴	تکرار ۴	۴/۱۴۹۷۱۵	۱۱/۲۰۰۰۰۷	۷/۰۵۰۲۹۲	-۰/۰۲۵۷۵۳	-۰/۰۱۴۰۴۰	۰/۰۰۵۳۶۳
۵	تکرار ۵	۴/۱۵۴۶۰۱	۱۱/۲۰۲۳۷۸	۷/۰۴۷۷۷۷	۰/۰۰۳۱۶۹	۰/۰۰۱۷۱۶	-۰/۰۰۰۶۵۵
۶	تکرار ۶	۴/۱۵۴۰۰۱	۱۱/۲۰۲۰۸۷	۷/۰۴۸۰۸۵	-۰/۰۰۰۳۸۹	-۰/۰۰۰۲۱۱	۰/۰۰۰۰۸۰
۷	تکرار ۷	۴/۱۵۴۰۷۵	۱۱/۲۰۲۱۲۲	۷/۰۴۸۰۴۷	۰/۰۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۰۲۶	-۰/۰۰۰۰۱۰
۸	تکرار ۸	۴/۱۵۴۰۶۶	۱۱/۲۰۲۱۱۸	۷/۰۴۸۰۵۲	-۰/۰۰۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰۱

۳-۳-۲- روش‌های اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس

الف- مدل اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس

با توجه به بخش ۲-۲-۶ طراحان روش نیوتنی هاردی کراس این روش را براساس اصول شبکه‌های توزیع آب طراحی کرده‌اند بنابراین این روش قادر به تحلیل همه شبکه‌های تهویه معادن نیست. بر این اساس رابطه ۲-۷ از این روش باید اصلاح شود و نتیجه آن در رابطه ۳-۴ نشان داده شده است.

$$\Delta Q^{(t)} = - \frac{M_{31} A_{11}^{(t)} Q^{(t)} - M_{31} (P_{Fan} + P_{Natural})}{|M_{31}| D_{11}^{(t)} \times M} \quad (4-3)$$

$$Q^{(t+1)} = Q^{(t)} + M_{13} \Delta Q^{(t)}$$

برای درک بهتر روش اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس از مثال مطرح شده در بخش ۳-۱ که مربوط به شکل ۳-۲ از شبکه تهویه فرضی است استفاده می‌شود. نتایج اولین مرحله از این روش به شرح ذیل و نتایج سایر مراحل دیگر آن توسط برنامه رایانه‌ای Ventilation Design مطابق جدول ۳-۲ خواهد شد. طبق جدول ۳-۲ روش اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس همگراست و طی ۲۴ تکرار محاسبات ریاضی به جواب نهایی می‌رسد. این نتایج با نتایج حاصل شده از نرم‌افزار Ventsim که پیش از این در شکل ۳-۳ ارائه شده کاملاً یکسان است.

- مرحله اول محاسبات:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4.5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 80 \\ 0 \\ -100 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} 10.5 \\ -10.38462 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{bc} \\ Q_{ab} \\ Q_{bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 10.5 \\ -10.38462 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.5 \\ -16.88462 \\ -4.38462 \end{bmatrix}$$

جدول ۳-۲ نتایج مدل اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس توسط Ventilation Design

ردیف	شرح	Q_{bc}	Q_{ab}	Q_{bd}	ΔQ_1	ΔQ_2
۱	تکرار ۱	۱۲/۵	-۱۶/۸۸۴۶۲	-۴/۳۸۴۶۲	۱۰/۵	-۱۰/۳۸۴۶۲
۲	تکرار ۲	۷/۲۷۶۲۴	-۹/۲۳۲۸۹	-۱/۹۵۶۶۵	-۵/۲۲۳۷۶	۲/۴۲۷۹۶
۳	تکرار ۳	۶/۶۲۱۷۷	-۱۳/۰۵۷۸۸	-۶/۴۳۶۱۱	-۰/۶۵۴۴۷	-۴/۴۷۹۴۶
۴	تکرار ۴	۴/۷۵۴۸۸	-۱۰/۴۷۲۳۵	-۵/۷۱۷۴۷	-۱/۸۶۶۸۹	۰/۷۱۸۶۴
۵	تکرار ۵	۴/۸۸۲۸۰	-۱۱/۶۸۴۲۳	-۶/۸۰۱۴۳	۰/۱۲۷۹۲	-۱/۰۸۳۹۶
۶	تکرار ۱۰	۴/۱۶۸۱۵	-۱۱/۱۸۳۲۳	-۷/۰۱۵۰۸	-۰/۰۴۹۹	۰/۰۰۸۷۶
۷	تکرار ۱۵	۴/۱۵۵۷۲	-۱۱/۲۰۳۱۴	-۷/۰۴۷۴۲	۰/۰۰۰۴۲	-۰/۰۰۲۲۴
۸	تکرار ۲۰	۴/۱۵۴۱۰	-۱۱/۲۰۲۰۸	-۷/۰۴۷۹۸	-۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۱۹
۹	تکرار ۲۴	۴/۱۵۴۰۷	-۱۱/۲۰۲۱۲	-۷/۰۴۸۰۵	-۰/۰۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۰۰۲

ب- مدل اصلاح شدهی مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس

با توجه به بخش ۲-۲-۷ طراحان روش مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس این روش را براساس اصول شبکه‌های توزیع آب طراحی کرده‌اند بنابراین این روش قادر به تحلیل همه شبکه‌های تهویه معادن نیست. بر این اساس تعدادی از این روابط در این روش باید اصلاح شوند و نتایج آن‌ها در روابط ۳-۵ تا ۳-۷ نشان داده شده است.

$$M_1 = |M_{31}| D_{11}^{(t)} M \quad (۳-۵)$$

$$M_2 = M_{31} A_{11}^{(t)} Q^{(t)} - M_{31} (P_{Fan} + P_{Natural}) \quad (۳-۶)$$

$$y^{(t)} = Q^{(t)} - M_{13} \frac{M_2}{M_1}$$

$$M_3 = M_{31} A_{11}^{(t)} y^{(t)} - M_{31} (P_{Fan} + P_{Natural}) \quad (۳-۷)$$

$$Q^{(t+1)} = Q^{(t)} - M_{13} \frac{M_2 + M_3}{M_1}$$

برای درک بهتر روش اصلاح شدهی مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس از مثال مطرح شده در بخش ۳-۳-۱ که مربوط به شکل ۳-۲ از شبکه تهویه فرضی است استفاده می‌شود. نتایج اولین مرحله از این روش به شرح ذیل و نتایج سایر مراحل دیگر آن توسط برنامه رایانه‌ای Ventilation Design مطابق جدول ۳-۳ خواهد شد. طبق جدول ۳-۳ روش اصلاح شدهی مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس همگراست و طی ۱۹ تکرار محاسبات ریاضی به جواب نهایی می‌رسد. این نتایج با نتایج حاصل شده از نرم‌افزار Ventsim که پیش از این در شکل ۳-۳ ارائه شده کاملاً یکسان است.

- مرحله اول محاسبات

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 \\ 13 \end{bmatrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4.5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 80 \\ 0 \\ -100 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -84 \\ 135 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{bc} \\ y_{ab} \\ y_{bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -10.5 \\ 10.38462 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.5 \\ -16.88462 \\ -4.38462 \end{bmatrix}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 12.5 & 0 & 0 \\ 0 & 8.442308 & 0 \\ 0 & 0 & 3.288462 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 12.5 \\ -16.88462 \\ -4.38462 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 80 \\ 0 \\ -100 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow M_3 = \begin{bmatrix} 218.795118 \\ -56.963757 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{bc} \\ Q_{ab} \\ Q_{bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 16.84939 \\ 6.002788 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -14.84939 \\ 14.846602 \\ -0.002788 \end{bmatrix}$$

جدول ۳-۳ نتایج مدل اصلاح شده مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس توسط Ventilation Design

ردیف	شرح	Q_{bc}	Q_{ab}	Q_{bd}	ΔQ_1	ΔQ_2
۱	تکرار ۱	-۱۴/۸۴۹۳۹۰	۱۴/۸۴۶۶۰۲	-۰/۰۰۲۷۸۸	۱۶/۸۴۹۳۹۰	۶/۰۰۲۷۸۸
۲	تکرار ۲	-۳/۹۳۸۳۴۶	-۴/۳۸۱۴۸۵	-۸/۳۱۹۸۳۱	-۱۰/۹۱۱۰۴۳	۸/۳۱۷۰۴۳
۳	تکرار ۳	۱/۲۰۲۴۰۴	-۷/۱۹۱۹۸۷	-۵/۹۸۹۵۸۳	-۵/۱۴۰۷۵۰	-۲/۳۳۰۲۴۸
۴	تکرار ۴	-۲/۳۲۱۷۳۵	-۱/۵۶۴۹۳۰	-۳/۸۸۶۶۶۵	۳/۵۲۴۱۳۹	-۲/۱۰۲۹۱۸
۵	تکرار ۱۰	۴/۰۰۰۴۳۶	-۱۱/۰۹۰۵۴۲	-۷/۰۹۰۱۰۶	-۰/۳۵۳۹۶۸	-۰/۱۳۴۹۱۷
۶	تکرار ۱۵	۴/۱۵۳۷۱۶	-۱۱/۲۰۱۸۵۰	-۷/۰۴۸۱۳۴	-۰/۰۰۰۸۳۶	-۰/۰۰۰۱۹۷
۷	تکرار ۱۹	۴/۱۵۴۰۶۴	-۱۱/۲۰۲۱۱۶	-۷/۰۴۸۰۵۲	-۰/۰۰۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۰۰۱

ج- مدل اصلاح شده مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس

با توجه به بخش ۲-۲-۸ طراحان روش مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس این روش را براساس اصول شبکه‌های توزیع آب طراحی کرده‌اند بنابراین این روش قادر به تحلیل همه شبکه‌های تهویه معادن نیست. بر این اساس تعدادی از این روابط در این روش باید اصلاح شوند و نتایج آن‌ها در روابط ۳-۸ تا ۳-۱۳ نشان داده شده است.

$$M_1 = |M_{31}| D_{11}^{(t)} M \quad (۳-۸)$$

$$M_2 = M_{31} A_{11}^{(t)} Q^{(t)} - M_{31} (P_{Fan} + P_{Natural}) \quad (۳-۹)$$

$$y^{(t)} = Q^{(t)} - M_{13} \frac{M_2}{M_1}$$

$$M_3 = M_{31} A_{11}'^{(t)} y^{(t)} - M_{31} (P_{Fan} + P_{Natural}) \quad (۳-۱۰)$$

$$z^{(t)} = y^{(t)} - M_{13} \left(\frac{M_3(2M_2 - M_3)/(2M_2 - 5M_3)}{M_1} \right)$$

$$M_4 = |M_{31}| D_{11}''^{(t)} M \quad (11-3)$$

$$M_5 = M_{31} A_{11}''^{(t)} z^{(t)} - M_{31} (P_{Fan} + P_{Natural}) \quad (12-3)$$

$$x^{(t)} = z^{(t)} - M_{13} \frac{M_5}{M_4}$$

$$M_6 = M_{31} A_{11}'''^{(t)} x^{(t)} - M_{31} (P_{Fan} + P_{Natural}) \quad (13-3)$$

$$Q^{(t+1)} = x^{(t)} - M_{13} \left(\frac{M_6(2M_5 - M_6)/(2M_5 - 5M_6)}{M_4} \right)$$

برای درک بهتر روش اصلاح شده‌ی مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس از مثال مطرح شده

در بخش ۱-۳-۳ که مربوط به شکل ۲-۳ از شبکه تهویه فرضی است استفاده می‌شود. نتایج اولین

مرحله از این روش به شرح ذیل و نتایج سایر مراحل دیگر آن توسط برنامه رایانه‌ای Ventilation

Design مطابق جدول ۴-۳ خواهد شد. طبق جدول ۴-۳ روش اصلاح شده‌ی مرتبه شانزدهم نیوتنی

هاردی کراس همگراست و طی ۸ تکرار محاسبات ریاضی به جواب نهایی می‌رسد. این نتایج با نتایج

حاصل شده از نرم‌افزار Ventsim که پیش از این در شکل ۳-۳ ارائه شده کاملاً یکسان است.

- مرحله اول محاسبات

$$M_1 = \begin{bmatrix} 8 \\ 13 \end{bmatrix}, \quad M_2 = \begin{bmatrix} -84 \\ 135 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} y_{bc} \\ y_{ab} \\ y_{bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.5 \\ -16.88462 \\ -4.38462 \end{bmatrix}, \quad M_3 = \begin{bmatrix} 218.795118 \\ -56.963757 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} z_{bc} \\ z_{ab} \\ z_{bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.5 \\ -16.88462 \\ -4.38462 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \frac{\begin{bmatrix} 67.06063 \\ -33.56964 \\ 8 \\ 13 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 8 \\ 13 \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} 4.117421 \\ -5.91975 \\ -1.80233 \end{bmatrix}$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 8.23484 & 0 & 0 \\ 0 & 5.91975 & 0 \\ 0 & 0 & 2.70350 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14.154595 \\ 8.623253 \end{bmatrix}$$

$$M_5 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 4.117421 & 0 & 0 \\ 0 & 2.959877 & 0 \\ 0 & 0 & 1.35175 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 4.117421 \\ -5.91975 \\ -1.80233 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 80 \\ 0 \\ -100 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow M_5 = \begin{bmatrix} -45.525105 \\ 80.041955 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_{bc} \\ x_{ab} \\ x_{bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.117421 \\ -5.91975 \\ -1.80233 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -45.525105 \\ 80.041955 \\ 14.154595 \\ 8.623253 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.333698 \\ -18.418138 \\ -11.08444 \end{bmatrix}$$

$$M_6 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 7.333698 & 0 & 0 \\ 0 & 9.209069 & 0 \\ 0 & 0 & 8.31333 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 7.333698 \\ -18.418138 \\ -18.418138 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 80 \\ 0 \\ -100 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow M_6 = \begin{bmatrix} 143.397026 \\ -161.7625 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{bc} \\ Q_{ab} \\ Q_{bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.333698 \\ -18.418138 \\ -11.08444 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 41.605903 \\ -53.73399 \\ 14.154595 \\ 8.623253 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.394307 \\ -9.247455 \\ -4.853149 \end{bmatrix}$$

جدول ۳-۴ نتایج مدل اصلاح شده‌ی مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس توسط Ventilation Design

ΔQ_2	ΔQ_1	Q_{bd}	Q_{ab}	Q_{bc}	شرح	ردیف
-۶/۲۳۱۲۹۱	۲/۹۳۹۳۹۲	-۴/۸۵۳۱۴۹	-۹/۲۴۷۴۵۵	۴/۳۹۴۳۳۰۷	تکرار ۱	۱
-۰/۰۰۲۳۴۵	۰/۱۰۹۷۲۳	-۶/۷۰۰۷۵۳	-۱۱/۰۱۲۶۶۵	۴/۳۱۱۹۱۳	تکرار ۲	۲
۰/۰۰۳۰۰۱	۰/۰۱۵۰۲۲	-۶/۹۷۱۰۷۵	-۱۱/۱۶۷۳۹۲	۴/۱۹۶۳۱۷	تکرار ۳	۳
۰/۰۰۱۲۱۱	۰/۰۰۲۵۰۷	-۷/۰۳۰۱۲۶	-۱۱/۱۹۴۷۳۲	۴/۱۶۴۶۰۷	تکرار ۴	۴
۰/۰۰۰۳۶۲	۰/۰۰۰۴۶۶	-۷/۰۴۳۸۱۷	-۱۱/۲۰۰۴۵۷	۴/۱۵۶۶۴۰	تکرار ۵	۵
۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۴	-۷/۰۴۷۹۹۴	-۱۱/۲۰۲۰۹۷	۴/۱۵۴۱۰۳	تکرار ۸	۶

۳-۳-۳ روش نیوتن-رافسون بدون مشتق

با توجه به روش نیوتن-رافسون با جهت‌های متغیر که در بخش ۲-۲-۱۰ ارائه شد بیانگر این مطلب است که اولاً این روش همگراست و ثانیاً از حجم محاسبات ریاضی نسبتاً بالایی برخوردار است که سبب عدم سهولت کاربرد آن می‌شود. بنابراین در این رساله جهت سهولت کاربرد روش مذکور، مساله مشتقات متوالی در روش جدید حذف شده به این دلیل نام روش جدید، روش نیوتن-رافسون بدون مشتق نامگذاری می‌شود. مراحل حل این روش جدید به شرح ذیل و فلوچارت آن در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.

مرحله اول: با توجه به قانون گره‌ها یک شدت جریان حجمی فرضی با جهت فرضی برای هر

یک از شاخه‌های شبکه تهویه در نظر گرفته می‌شود.

مرحله دوم: شناسایی حلقه‌های مفید در شبکه تهویه طبق رابطه ۲-۴ و انتخاب یک جهت

فرضی برای همه‌ی آن‌ها

مرحله سوم: محاسبه افت فشار هوا برای هر حلقه از شبکه تهویه طبق رابطه ۳-۱۴.

$$P_k = \sum \pm R_i |Q_i| (Q_i + \sum \pm \Delta Q_j) - \sum (P_{Fi} + P_{Ni}) \quad (۳-۱۴)$$

که در آن:

P_k : افت فشار هر حلقه

R_i : مقاومت هر شاخه‌ی وابسته به حلقه

Q_i : شدت جریان حجمی هر شاخه‌ی وابسته به حلقه

ΔQ_j : مقدار خطای شدت جریان حجمی هر حلقه در شاخه وابسته

P_{Fi} : فشار استاتیکی بادبزن برای هر شاخه‌ی وابسته به حلقه

P_{Ni} : فشار طبیعی هر شاخه‌ی وابسته به حلقه

مرحله چهارم: محاسبه مقدار خطای شدت جریان حجمی هر حلقه از شبکه تهویه با استفاده از

رابطه ۳-۱۵.

$$P_k = \sum \pm R_i |Q_i| (Q_i + \sum \pm \Delta Q_j) - \sum (P_{Fi} + P_{Ni}) = 0 \quad (۳-۱۵)$$

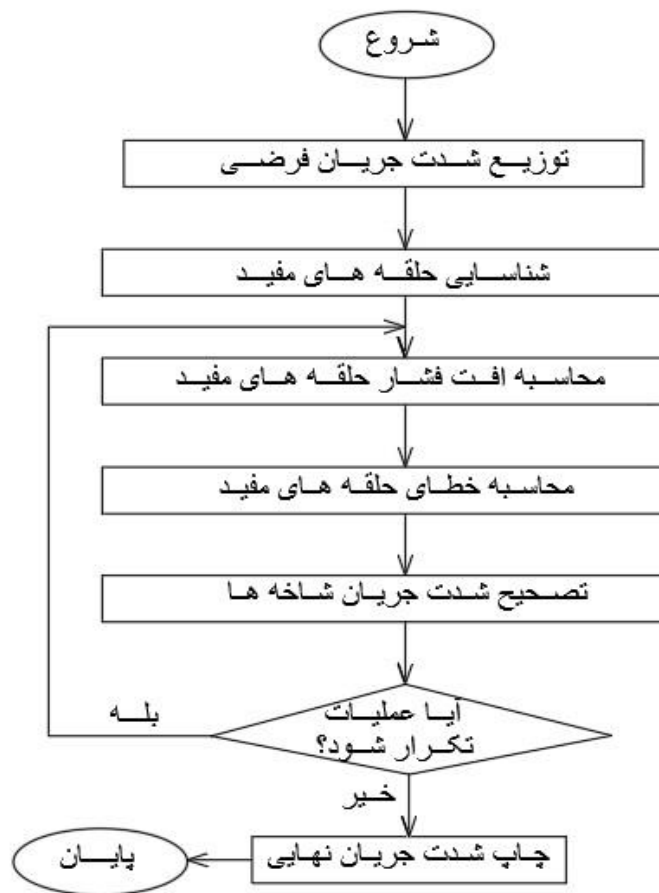
مرحله پنجم: محاسبه شدت جریان حجمی جدید هر شاخه طبق روابط ۳-۱۶ و ۳-۱۷.

$$Q_i^{n+1} = Q_i^n + \sum \pm \Delta Q_j \quad (۳-۱۶)$$

$$Q_i^{(n+1)} = 0.5 (Q_i^n + Q_i^{n+1}) \quad (۳-۱۷)$$

مرحله ششم: تکرار عملیات از مرحله سوم تا مادامی که مقدار خطای شدت جریان حجمی هر

حلقه برابر یا کوچکتر از دقت انجام محاسبات شود.



شکل ۳-۹ فلوچارت روش نیوتن - رافسون بدون مشتق

برای درک بهتر حذف مشتقات متوالی در روش نیوتن - رافسون بدون مشتق از مثال مطرح شده در بخش ۳-۱-۳ که مربوط به شکل ۳-۲ از شبکه تهویه فرضی است استفاده می شود. نتایج دو مرحله از این روش به شرح ذیل و نتایج سایر مراحل دیگر آن توسط برنامه رایانه ای Ventilation Design مطابق جدول ۳-۵ خواهد شد. طبق جدول ۳-۵ روش نیوتن - رافسون بدون مشتق همگراست و طی ۶ تکرار محاسبات ریاضی به جواب نهایی می رسد. این نتایج با نتایج حاصل شده از نرم افزار Ventsim که پیش از این در شکل ۳-۳ ارائه شده کاملاً یکسان است.

- مرحله اول محاسبات

$$P_1 = R_{bc}|Q_{bc}|(Q_{bc} + \Delta Q_1) - R_{ab}|Q_{ab}|(Q_{ab} - \Delta Q_1 + \Delta Q_2) - 80$$

$$P_2 = R_{ab}|Q_{ab}|(Q_{ab} - \Delta Q_1 + \Delta Q_2) + R_{bd}|Q_{bd}|(Q_{bd} + \Delta Q_2) + 100$$

$$\begin{cases} 2 \times (2 + \Delta Q_1) - 0.5 \times 4 \times (4 - \Delta Q_1 + \Delta Q_2) - 80 = 0 \\ 0.5 \times 4 \times (4 - \Delta Q_1 + \Delta Q_2) + 0.75 \times 6 \times (6 + \Delta Q_2) + 100 = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta Q_1 = 12.54546 \\ \Delta Q_2 = -16.90909 \end{cases}$$

$$Q_{bc}^1 = 2 + 12.54546 = 14.54546 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{ab}^1 = 4 - 12.54546 - 16.90909 = -25.45455 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{bd}^1 = 6 - 16.90909 = -10.90909 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{bc}^1 = 0.5 \times (2 + 14.54546) = 8.27273 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{ab}^1 = 0.5 \times (4 - 25.45455) = -10.72727 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{bd}^1 = 0.5 \times (6 - 10.90909) = -2.45454 \text{ m}^3 / \text{s}$$

- مرحله دوم محاسبات

$$\begin{cases} 8.27273 \times (8.27273 + \Delta Q_1) - 0.5 \times |-10.72727| \times (-10.72727 - \Delta Q_1 + \Delta Q_2) - 80 = 0 \\ 0.5 \times -10.72727 \times (-10.72727 - \Delta Q_1 + \Delta Q_2) + 0.75 \times |-2.45454| \times (-2.45454 + \Delta Q_2) + 100 = 0 \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} \Delta Q_1 = -7.69698 \\ \Delta Q_2 = -10.99695 \end{cases}$$

$$Q_{bc}^1 = 8.27273 - 7.69698 = 0.57575 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{ab}^1 = -10.72727 + 7.69698 - 10.99695 = -14.02724 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{bd}^1 = -2.45454 - 10.99695 = -13.45149 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{bc}^1 = 0.5 \times (8.27273 + 0.57575) = 4.42424 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{ab}^1 = 0.5 \times (-10.72727 - 14.02724) = -12.37726 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{bd}^1 = 0.5 \times (-2.45454 - 13.45149) = -7.95302 \text{ m}^3 / \text{s}$$

جدول ۳-۵ نتایج روش نیوتن-رافسون بدون مشتق توسط Ventilation Design

ردیف	شرح	Q_{bc}	Q_{ab}	Q_{bd}	ΔQ_1	ΔQ_2
۱	تکرار ۱	۸/۲۷۲۷۲۷	-۱۰/۷۲۷۲۷۳	-۲/۴۵۴۵۴۵	۱۲/۵۴۵۴۵۵	-۱۶/۹۰۹۰۹۱
۲	تکرار ۲	۴/۴۲۴۲۳۶	-۱۲/۳۷۷۲۵۷	-۷/۹۵۳۰۲۱	-۷/۶۹۶۹۸۲	-۱۰/۹۹۶۹۵۰
۳	تکرار ۳	۴/۱۶۰۷۰۸	-۱۱/۲۵۹۰۵۴	-۷/۰۹۸۳۴۶	-۰/۵۲۷۰۵۷	۱/۷۰۹۳۴۸
۴	تکرار ۴	۴/۱۵۴۰۵۷	-۱۱/۲۰۲۲۷۴	-۷/۰۴۸۲۱۷	-۰/۰۱۳۳۰۲	۰/۱۰۰۲۵۸

ادامه جدول ۳-۵ نتایج روش نیوتن-رافسون بدون مشتق توسط Ventilation Design

ردیف	شرح	Q_{bc}	Q_{ab}	Q_{bd}	ΔQ_1	ΔQ_2
۵	تکرار ۵	۴/۱۵۴۰۶۷	-۱۱/۲۰۲۱۱۸	-۷/۰۴۸۰۵۱	۰/۰۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۳۳۲
۶	تکرار ۶	۴/۱۵۴۰۶۷	-۱۱/۲۰۲۱۱۸	-۷/۰۴۸۰۵۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰

۳-۴- روش‌های جدید طراحی تهویه در مدل تراکم‌پذیری

۳-۴-۱- مقدمه

به طور معمول برای حل مسائل مربوط به هوای مرطوب در مدل تراکم‌پذیری نیاز به حل معادلات ۲-۴۲ تا ۲-۶۳ است. این معادلات مستقل از هم نبوده بلکه به هم وابسته‌اند و این عامل سبب پیچیدگی حل معادله نهایی خواهد شد. روش رایج برای حل این دسته از معادلات، استفاده از روش‌های محاسبات عددی همچون روش نیوتن-رافسون است. از دیدگاه علم ریاضی برای حل این روش نیازمند سه مرحله محاسبات مختلف است. این مراحل به شرح ذیل بیان می‌شوند:

- مرحله اول: ساده‌سازی معادلات

در مرحله اول لازم است معادلات ۲-۴۲ تا ۲-۶۳ ساده شده و با هم تلفیق شوند. بر این اساس نتایج به شرح ذیل بیان می‌شوند:

الف- برآورد مقدار اختلاف انرژی پتانسیل

طبق رابطه ۲-۵۵ همه پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه این معادله، معلوم بوده بنابراین مقدار نهایی این معادله همواره برابر یک عدد حقیقی است که طبق رابطه ۳-۱۸ برآورد می‌شود.

$$\Delta_{ep}^* = g(Z_2 - Z_1) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2} \right) = B_1 \quad (۳-۱۸)$$

ب- برآورد مقدار سرعت نهایی هوای خروجی

طبق رابطه ۲-۵۶ تنها پارامتر مجهول این معادله برابر p_{d2} است. در نتیجه مقدار نهایی این معادله طبق رابطه ۳-۱۹ برآورد می‌شود.

$$V_2 = \frac{\rho_{d1} V_1 S_1}{\rho_{d2} S_2} = \frac{B_2}{\rho_{d2}} \quad (19-3)$$

ج- برآورد مقدار اختلاف انرژی جنبشی

طبق رابطه ۲-۵۷ تنها پارامتر مجهول این معادله برابر ρ_{d2} است. بنابراین مقدار نهایی این معادله طبق رابطه ۳-۲۰ برآورد می‌شود.

$$\Delta_{ek}^* = \frac{B_3}{2\rho_{d2}} + B_4 \quad (20-3)$$

د- برآورد قسمت اول معادله ترمودینامیکی

براساس قسمت اول رابطه ۲-۵۴ تنها پارامتر مجهول این معادله برابر ρ_{d2} است. در نتیجه مقدار نهایی این معادله طبق رابطه ۳-۲۱ برآورد می‌شود.

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} = -B_1 - \left(\frac{B_3}{2\rho_{d2}} + B_4\right) + B_5 = \frac{A_1}{2\rho_{d2}} + A_2 \quad (21-3)$$

ه- برآورد قسمت سوم معادله ترمودینامیکی

براساس قسمت سوم رابطه ۲-۵۴ تنها پارامتر مجهول این معادله برابر t_{d2} است. بنابراین مقدار نهایی این معادله طبق رابطه ۳-۲۲ برآورد می‌شود.

$$h_{12}^* - q_{12} = c_p(t_{d2} - t_{d1}) + w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w} - q_{12}$$

$$h_{12}^* - q_{12} = A_3 t_{d2} + A_4 \quad (22-3)$$

و- برآورد دمای نهایی هوای خروجی

طبق روابط ۳-۲۰ و ۳-۲۱ تنها پارامتر مجهول این معادله برابر ρ_{d2} است. در نتیجه مقدار نهایی این معادله طبق رابطه ۳-۲۳ برآورد می‌شود.

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} - (h_{12}^* - q_{12}) = 0 \rightarrow t_{d2} = \frac{A_5}{2\rho_{d2}} + A_6 \quad (23-3)$$

ز- برآورد فشار نهایی هوای خروجی

طبق رابطه ۲-۴۲ تنها پارامتر مجهول این معادله برابر ρ_{d2} است. بنابراین مقدار نهایی این

معادله طبق رابطه ۳-۲۴ برآورد می‌شود.

$$P_2 = P_{d2} + P_{v2} = \frac{A_7}{\rho_{d2}} + A_8 \rho_{d2} \quad (۳-۲۴)$$

ح- برآورد کار اصطکاکی

طبق رابطه ۲-۳۹ تنها پارامتر مجهول این معادله برابر ρ_{d2} است. در نتیجه مقدار نهایی این

معادله طبق رابطه ۳-۲۵ برآورد می‌شود.

$$F_{12} = \frac{f}{2} \frac{LP}{S} V^2 = \frac{A_9}{\rho_{d2}^2} + \frac{A_{10}}{\rho_{d2}} + A_{11} \quad (۳-۲۵)$$

ط- برآورد کار جریانی

طبق روابط ۲-۵۸ و ۳-۲۳ تنها پارامتر مجهول این معادله برابر ρ_{d2} است. بنابراین مقدار نهایی

این معادله طبق رابطه ۳-۲۶ برآورد می‌شود.

$$\int V dp = \left(\frac{P_2}{\rho_{d2}} - \frac{P_1}{\rho_{d1}} \right) \frac{k}{k-1}$$

$$\int V dp = \left(\frac{A_{12}}{\rho_{d2}^2} + A_{13} \right) \times \left(\frac{\frac{\ln(\frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15} \rho_{d2})}{\rho_{d2}}}{\frac{\ln(\frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15} \rho_{d2})}{\rho_{d2}} - \ln(A_{16} \rho_{d2})} \right) \quad (۳-۲۶)$$

ی- برآورد جرم حجمی هوای خروجی

طبق روابط ۳-۲۰، ۳-۲۴ و ۳-۲۵ تنها پارامتر مجهول این معادله برابر ρ_{d2} است. در نتیجه

مقدار نهایی این معادله طبق روابط ۳-۲۷ و ۳-۲۸ برآورد می‌شود.

$$-\Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12} - (\int V dP + F_{12}) = 0 \quad (۳-۲۷)$$

$$F(\rho_{d2}) = \frac{A_1}{\rho_{d2}^2} + A_2 - \left(\frac{A_9}{\rho_{d2}^2} + \frac{A_{10}}{\rho_{d2}} + A_{11} \right) - \left(\frac{A_{12}}{\rho_{d2}^2} + A_{13} \right) \times \left(\frac{\frac{\ln(\frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15}\rho_{d2})}{\rho_{d2}}}{\frac{\ln(\frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15}\rho_{d2}) - \ln(A_{16}\rho_{d2})}{\rho_{d2}}} \right) \quad (28-3)$$

- مرحله دوم: استفاده از مشتق

در مرحله دوم نیازمند مشتق از معادله ۲۸-۳ است که نتیجه آن در معادله ۲۹-۳ نشان داده شده است. با توجه به معادله ۲۹-۳ مشتق آن از یک معادله حجیمی برخوردار می‌شود.

$$F'(\rho_{d2}) = \left[\frac{A_1}{\rho_{d2}^2} + A_2 - \left(\frac{A_9}{\rho_{d2}^2} + \frac{A_{10}}{\rho_{d2}} + A_{11} \right) - \left(\frac{A_{12}}{\rho_{d2}^2} + A_{13} \right) \times \left(\frac{\frac{\ln(\frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15}\rho_{d2})}{\rho_{d2}}}{\frac{\ln(\frac{A_{14}}{\rho_{d2}} + A_{15}\rho_{d2}) - \ln(A_{16}\rho_{d2})}{\rho_{d2}}} \right) \right]' \quad (29-3)$$

- مرحله سوم: استفاده از معادله نیوتن - رافسون

در مرحله سوم لازم است از معادله نیوتن - رافسون استفاده شود که نتیجه آن در معادله ۳۰-۳ نشان داده شده است.

$$\rho'_{d2} = \rho_{d2} - \frac{F(\rho_{d2})}{F'(\rho_{d2})} \quad (30-3)$$

با توجه به معادلات ۲۸-۳ و ۲۹-۳ می‌توان نتیجه گرفت که معادله ۳۰-۳ یک معادله حجیم و پیچیده خواهد شد. به دلیل حجیم شدن معادله ۳۰-۳، حل این مدل مسائل در طراحی تهویه معادن

به صورت دستی وقت گیر و پر خطاست. همچنین استفاده از سایر روش های تقریبی ریاضی که بر پایه مشتق استوار هستند نیز سبب پیچیدگی و افزایش حجم محاسبات ریاضی خواهند شد. بنابراین برای حل این مدل مسائل در طراحی تهویه معادن دو راه حل پیشنهاد می شود اولاً از نرم افزارهای محاسبات عددی استفاده شود ثانیاً از روش های ابتکاری با عملکرد ساده تر ابداع شود. بر این اساس در این رساله سه روش ساده تر با عنوان روش های دلتا، K و K-W ارائه می شود.

۳-۴-۲- روش دلتا (Δ)

روش دلتا برای حل ساده تر معادلات مطرح شده در مدل مرطوب تراکم پذیری است. نام گذاری این روش به دلیل محاسبه مقدار اختلاف بین دو قسمت دوم و اول معادلات ترمودینامیکی است. این روش از سه مرحله تشکیل شده که مراحل حل آن به شرح ذیل و فلوچارت آن در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.

الف- فرضیات اولیه

برای حل معادلات مطرح شده نیاز به یکسری فرضیاتی است که در روابط ۳-۳۱ تا ۳-۳۳ ارائه شده است.

$$V_2 = 1.1V_1 \quad (3-31)$$

$$t_{d2} = 1.1t_{d1} \quad (3-32)$$

$$\rho_{d2} = 1.1\rho_{d1} \quad (3-33)$$

ب- محاسبات اصلی

در این مرحله با توجه به قوانین ترمودینامیکی و تفکیک آن ها از هم سبب ایجاد ۱۰ معادله

شده که اصول محاسبات اصلی را برعهده گرفته و به شرح ذیل بیان می شوند:

$$\Delta_{ep}^* = g(Z_2 - Z_1) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right)$$

$$\Delta_{ek}^* = \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right)$$

$$c = w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w} \quad (34-3)$$

$$t_{d2} = t_{d1} + \frac{q_{12} - c - \Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12}}{c_p} \quad (35-3)$$

$$F_{12} = \frac{f}{8} \frac{LP}{S} (V_2 + V_1)^2 \quad (36-3)$$

$$P_2 = (R_d + R_v w_2) T_{d2} \rho_{d2} \quad (37-3)$$

$$k = \frac{\ln(P_2/P_1)}{\ln(\rho_{d2}/\rho_{d1})}$$

$$\Delta = \left(\frac{P_2}{\rho_{d2}} - \frac{P_1}{\rho_{d1}} \right) \frac{k}{k-1} + F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} \quad (38-3)$$

$$\rho_{d2} = \rho_{d2} - \Delta \times 10^{-5} \quad (39-3)$$

$$V_2 = \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho_{d2}} \quad (40-3)$$

ج- تعداد تکرار محاسبات

اگر مقدار دلتا در رابطه ۳-۳۸، کوچک تر یا مساوی مقدار دقت محاسبات شود در این صورت

حل مجدد ۱۰ معادله فوق متوقف شده و پایان عملیات انجام محاسبات اعلام می شود.

برای درک بهتر روش دلتا به مدل فرضی ذیل توجه شود. در این مدل یک چاه قائم با مقطع

دایره به شعاع ۱/۵ در ارتفاع ۳۰۰۰ متری از سطح آب های آزاد به عمق ۱۰۰۰ متر حفر شده است.

یک فن در دهانه چاه نصب و هوای تمیز را به صورت دهشی به درون چاه قائم می دمد. سرعت هوا در

ابتدای حفاری برابر ۷ متر بر ثانیه، ضریب اصطکاک مسیر حفاری ۰/۰۲، دمای هوا ورودی و رطوبت

نسبی آن در این نقطه به ترتیب ۳۰ درجه ساتیگراد و ۲۵ درصد است. مقدار گرمای تولید شده در

این حفاری برابر ۵۰ کیلو وات فرض می شود. اگر آهنگ تبخیر در طول حفاری برابر ۰/۰۰۰۶۵ برای

یک کیلوگرم هوای خشک فرض شود در این صورت مشخصات هوای خروجی را در انتهای حفاری

بیابید.

مرحله اول نتایج روش دلتا (Δ) در تحلیل سیال تراکم پذیر برای هوای مرطوب به شرح ذیل و

نتایج سایر مراحل آن با استفاده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۳-۶ نشان داده شده است. طبق جدول ۳-۶ تعداد تکرار محاسبات ریاضی با فرض ۰/۰۰۱ دقت انجام محاسبات برابر ۱۲ تکرار می‌شود.

- مرحله اول محاسبات

$$\begin{aligned}
 h &= 3000 - 0 = 3000m \rightarrow T = 273.15 + \frac{30+15}{2} = 295.65^{\circ}C \\
 \ln P_1 &= \ln P_0 - \frac{h}{RT} = \ln(101325) - \frac{3000}{287.04 \times 295.65} \rightarrow P_1 = 97805.639 Pa \\
 t_{d1} &= 30^{\circ}C \rightarrow P_{vsd1} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27 t_{d1}}{237.3 + t_{d1}}\right) = 4241.676 Pa \\
 R_{h1} &= \%25 \rightarrow P_{v1} = R_{h1} \times P_{vsd1} = 1060.419 Pa \\
 P_1 &= 97805.639 Pa \rightarrow w_1 = \frac{0.622 P_{v1}}{P_1 - P_{v1}} = 0.00681771 \frac{kg}{kg} \\
 w_2 &= w_1 + 0.00065 = 0.00746771 \frac{kg}{kg} \\
 \rho_{d1} &= \frac{P_1 - P_{v1}}{287.04 T_{d1}} = 1.111807 \frac{kg}{m^3} \\
 V_2 &= 1.1 V_1 = 1.1 \times 7 = 7.7 \frac{m}{s} \\
 t_{d2} &= 1.1 t_{d1} = 1.1 \times 30 = 33^{\circ}C \\
 \rho_{d2} &= 1.1 \rho_{d1} = 1.1 \times 1.111807 = 1.222988 \frac{kg}{m^3} \\
 \Delta_{ep}^* &= g(Z_2 - Z_1) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) = 9.80665 \times -1000 \times 0.503571 = -9876.69627 \frac{J}{kg} \\
 \Delta_{ek}^* &= \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) = \frac{1}{2} \times 10.29 \times 0.503571 = 5.181749 \frac{J}{kg} \\
 c &= w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w} = 1615.499649 \frac{J}{kg} \\
 q_{12} &= \frac{N}{\rho_{d1} V_{s1}} = \frac{50 \times 1000}{1.111807 \times 7 \times 7.0686} = 908.885 \frac{J}{kg} \\
 W_{12} &= 0 \\
 t_{d2} &= t_{d1} + \frac{q_{12} - c - \Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12}}{c_p} = 39.119303^{\circ}C
 \end{aligned}$$

$$F_{12} = \frac{f}{8} \frac{LP}{S} (V_2 + V_1)^2 = 720.299960 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$P_2 = (R_v w_2 + R_d) T_{d2} \rho_{d2} = 110937.20870 \text{ Pa}$$

$$k = \frac{\frac{\ln(P_2/P_1)}{\ln(\rho_{d2}/\rho_{d1})}}{\ln(P_2/P_1)} = 1.321812$$

$$\Delta = \left(\frac{P_2}{\rho_{d2}} - \frac{P_1}{\rho_{d1}} \right) \frac{k}{k-1} + F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} = 2103.13977$$

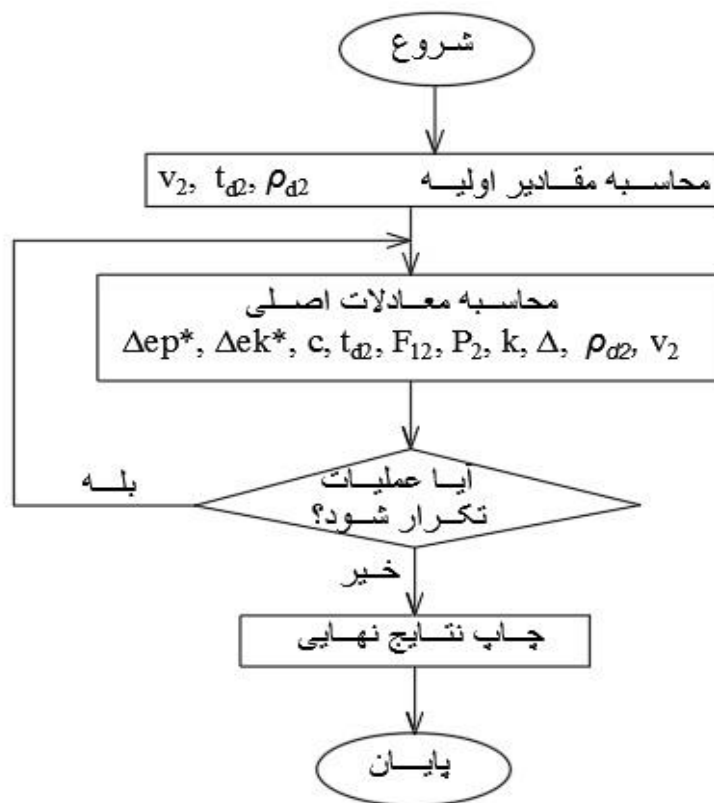
$$\rho_{d2} = \rho_{d2} - \Delta \times 10^{-5} = 1.201957 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_2 = \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho_{d2}} = 6.474985 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

جدول ۳-۶ نتایج مراحل روش دلتا (Δ) در طراحی تهویه برای هوای مرطوب تراکم پذیر توسط

Ventilation Design

تکرار ۱۲	تکرار ۱۱	تکرار ۹	تکرار ۷	تکرار ۵	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱	شرح
-۳/۳۶۶۳۵۴	-۳/۳۶۶۳۵۵	-۳/۳۶۶۳۶۹	-۳/۳۶۶۵۸۴	-۳/۳۶۹۸۰۳	-۳/۴۱۷۷۵۹	-۳/۵۶۲۵۵۱	۵/۱۸۱۷۴۹	Δ_{ek}
-۹۸۷۶/۶۹۹۶	-۹۸۷۶/۶۹۹۶	-۹۸۷۶/۶۹۹۶	-۹۸۷۶/۶۹۹۶	-۹۸۷۶/۶۹۹۶	-۹۸۷۶/۶۹۹۶	-۹۸۷۶/۶۹۹۶	-۹۸۷۶/۶۹۹۶	Δ_{ep}
۳۹/۰۵۴۶۰۲	۳۹/۰۵۴۶۰۲	۳۹/۰۵۴۶۰۲	۳۹/۰۵۴۶۰۲	۳۹/۰۵۴۶۰۵	۳۹/۰۵۴۶۶۰	۳۹/۰۵۴۰۱۵	۳۹/۱۱۹۳۰۳	t_{d2}
۶۰۷/۹۵۰۱۶۱	۶۰۷/۹۵۰۱۵۰	۶۰۷/۹۴۹۹۵۳	۶۰۷/۹۴۶۹۹۵	۶۰۷/۹۰۲۷۶۰	۶۰۷/۲۴۳۵۱۰	۶۰۵/۲۵۰۶۹۷	۷۲۰/۲۹۹۲۶۰	F_{12}
۱۰۸۵۰۳/۸۶۶	۱۰۸۵۰۳/۸۶۸	۱۰۸۵۰۳/۹۰۴	۱۰۸۵۰۴/۴۵۲	۱۰۸۵۱۲/۶۵۰	۱۰۸۶۳۵/۰۰۰	۱۰۹۰۰۶/۶۵۶	۱۱۰۹۳۷/۲۰۹	P_2
۱/۴۱۵۳۹۷	۱/۴۱۵۳۹۶	۱/۴۱۵۳۹۵	۱/۴۱۵۳۶۶	۱/۴۱۴۹۳۹	۱/۴۰۸۶۷۰	۱/۳۹۰۷۳۰	۱/۳۲۱۸۱۲	k
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۳۲	۰/۴۸۰	۷/۱۸۰	۱۰۷/۱۳۲	۴۱۰/۰۵۲	۲۱۰۳/۱۳۴	Δ
۱/۱۹۶۴۱۰	۱/۱۹۶۴۱۰	۱/۱۹۶۴۱۱	۱/۱۹۶۴۱۲	۱/۱۹۶۴۳۵	۱/۱۹۶۷۸۵	۱/۱۹۷۸۵۶	۱/۲۰۱۹۵۷	ρ_{d2}
۶/۵۰۵۰۰۱	۶/۵۰۵۰۰۱	۶/۵۰۵۰۰۱	۶/۵۰۴۹۹۲	۶/۵۰۴۸۶۵	۶/۵۰۲۹۶۶	۶/۴۹۷۱۵۰	۶/۴۷۴۹۸۵	V_2



شکل ۳-۱۰ فلوجارت روش دلتا (Δ)

۳-۴-۳ روش K

روش K برای حل ساده‌تر معادلات مطرح شده در مدل مرطوب تراکم‌پذیری و همچنین برای همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی نسبت به روش دلتا ارائه می‌شود. چون مهم‌ترین معادله در این روش مربوط به محاسبه ضریب K است بر این اساس نام این روش به نام K نامگذاری شد. این روش از سه مرحله تشکیل شده که مراحل حل آن به شرح ذیل و فلوجارت آن در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است.

الف- فرضیات اولیه

برای حل معادلات مطرح شده نیاز به یکسری فرضیاتی است که به شرح ذیل بیان می‌شوند:

$$V_2 = 1.1V_1$$

$$t_{d2} = 1.1t_{d1}$$

$$P_2 = 1.1P_1$$

(۴۱-۳)

ب- محاسبات اصلی

در این مرحله با توجه به قوانین ترمودینامیکی و تفکیک آن‌ها از هم سبب ایجاد ۱۰ معادله

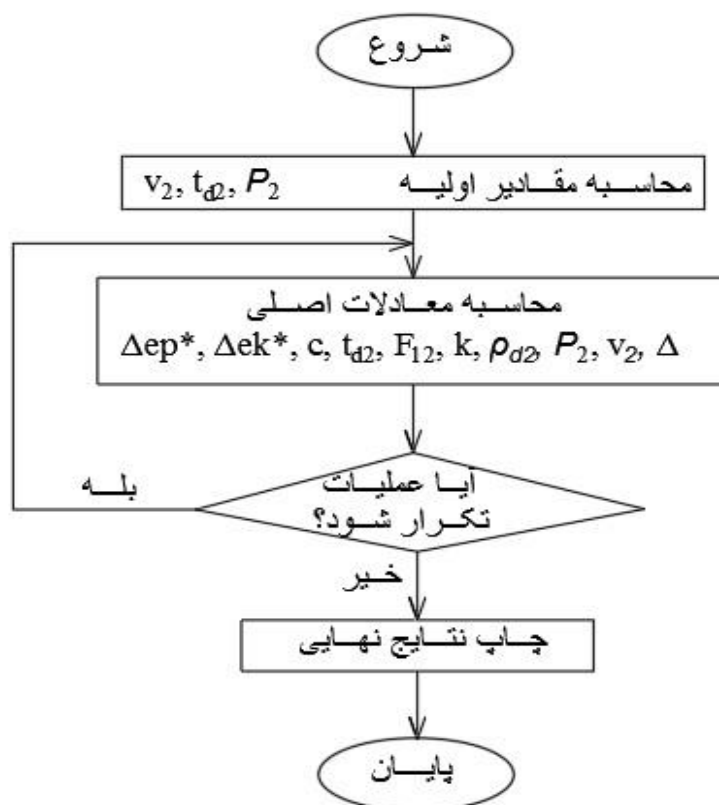
شده که شامل محاسبات اصلی بوده و به شرح ذیل بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned}\Delta_{ep}^* &= g(Z_2 - Z_1)(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}) \\ \Delta_{ek}^* &= \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}) \\ c &= w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \bar{h}_w \\ t_{d2} &= t_{d1} + \frac{q_{12} - c - \Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12}}{c_p} \\ F_{12} &= \frac{f}{8} \frac{LP}{S} (V_2 + V_1)^2 \\ K &= \frac{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12}}{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} + R_d(t_{d2} - t_{d1}) + R_v(w_2 T_{d2} - w_1 T_{d1})} \quad (42-3) \\ \rho_{d2} &= \rho_{d1} \left[\frac{(R_d + R_v w_2) T_{d2}}{(R_d + R_v w_1) T_{d1}} \right]^{\frac{1}{K-1}} \quad (43-3) \\ P_2 &= P_1 \left(\frac{\rho_{d2}}{\rho_{d1}} \right)^K \quad (44-3) \\ V_2 &= \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho_{d2}} \\ \Delta &= |P_2^{n+1} - P_2^n| \quad (45-3)\end{aligned}$$

ج- تعداد تکرار محاسبات

اگر مقدار دلتا در رابطه ۴۵-۳، کوچک‌تر یا مساوی مقدار دقت محاسبات شود در این صورت

حل مجدد ۱۰ معادله فوق متوقف شده و پایان عملیات انجام محاسبات اعلام می‌شود.



شکل ۳-۱۱ فلوجارت روش K

برای درک بهتر روش K به مثال مطرح شده در بخش ۳-۴-۲ توجه شود. مرحله اول نتایج این روش در تحلیل سیال تراکم پذیر برای هوای مرطوب به شرح ذیل و نتایج سایر مراحل آن با استفاده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۳-۷ نشان داده شده است. طبق جدول ۳-۷ تعداد تکرار محاسبات ریاضی با فرض ۰/۰۰۱ دقت انجام محاسبات برابر ۵ تکرار می‌شود. بنابراین این روش در این مدل قادر است تعداد تکرار محاسبات را ۵۸ درصد کاهش دهد.

- مرحله اول محاسبات

$$V_2 = 7.7 \frac{m}{s}$$

$$\Delta_{ep}^* = -9876.69627 \frac{J}{kg}$$

$$w_1 = 0.00681771 \frac{kg}{kg}$$

$$c = 1615.499649 \frac{J}{kg}$$

$$t_{d2} = 33^{oc}$$

$$\Delta_{ek}^* = 5.181749 \frac{J}{kg}$$

$$w_2 = 0.00746771 \frac{kg}{kg}$$

$$W_{12} = 0$$

$$q_{12} = 908.885 \frac{J}{kg} \quad F_{12} = 720.299960 \frac{J}{kg}$$

$$t_{d2} = t_{d1} + \frac{q_{12} - c - \Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12}}{c_p} = 39.119303^{\circ}C$$

$$K = \frac{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12}}{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} + R_d(t_{d2} - t_{d1}) + R_v(w_2 T_{d2} - w_1 T_{d1})} = 1.427370$$

$$\rho_{d2} = \rho_{d1} \left[\frac{(R_d + R_v w_2) T_{d2}}{(R_d + R_v w_1) T_{d1}} \right]^{\frac{1}{K-1}} = 1.194532 \frac{kg}{m^3}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{\rho_{d2}}{\rho_{d1}} \right)^K = 108355.94831 Pa$$

$$V_2 = \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho_{d2}} = 6.515228 \frac{m}{s} \quad \Delta = |P_2^{n+1} - P_2^n| = 769.7431$$

جدول ۳-۷ نتایج مراحل روش K در طراحی تهویه برای هوای مرطوب تراکم پذیر توسط

Ventilation Design

شرح	تکرار ۱	تکرار ۲	تکرار ۳	تکرار ۴	تکرار ۵
Δ_{ek}	۵/۱۸۱۷۴۹	-۳/۲۹۹۳۰۱	-۳/۳۶۶۰۲۴	-۳/۳۶۶۳۷۰	-۳/۳۶۶۳۷۳
Δ_{ep}	-۹۸۷۶/۶۹۶۰۳	-۹۸۷۶/۶۹۶۰۳	-۹۸۷۶/۶۹۶۰۳	-۹۸۷۶/۶۹۶۰۳	-۹۸۷۶/۶۹۶۰۳
t_{d2}	۳۹/۱۱۹۳۰۳	۳۹/۰۵۳۷۵۳	۳۹/۰۵۴۶۱۲	۳۹/۰۵۴۶۰۲	۳۹/۰۵۴۶۰۲
F_{12}	۷۲۰/۲۹۹۹۶۰	۶۰۸/۸۷۱۲۶۲	۶۰۷/۹۵۴۶۹۵	۶۰۷/۹۴۹۹۴۳	۶۰۷/۹۴۹۸۹۰
k	۱/۴۲۷۳۷۰	۱/۴۱۵۳۹۷	۱/۴۱۵۳۸۸	۱/۴۱۵۳۸۷	۱/۴۱۵۳۸۷
ρ_{d2}	۱/۱۹۴۵۳۲	۱/۱۹۶۴۰۱	۱/۱۹۶۴۱۱	۱/۱۹۶۴۱۱	۱/۱۹۶۴۱۱
P_2	۱۰۸۳۵۵/۹۴۷۸	۱۰۸۵۰۲/۶۷۷۴	۱۰۸۵۰۳/۸۵۶۳	۱۰۸۵۰۳/۸۶۲۷	۱۰۸۵۰۳/۸۶۲۷
V_2	۷/۷	۶/۵۱۵۲۲۸	۶/۵۰۵۰۵۲	۶/۵۰۴۹۹۹	۶/۵۰۴۹۹۸
Δ	۷۶۹/۷۴۳۱	-۱۴۶/۷۲۹۶	-۱/۱۷۸۹	-۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۰۰

۳-۴-۴- بهبود معادلات ترمودینامیکی

تعدادی از پارامترهای مطرح شده در بخش‌های ۳-۴-۳ و ۳-۴-۳ مانند شتاب ثقل کره زمین

(g)، ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت (C_p) و حجم ثابت (C_v) معادل با مقادیری ثابت در نظر

گرفته شده است. ولی این مقادیر ثابت مربوط به شرایط خاصی از محیط اطراف است. بنابراین مقادیر

واقعی پارامترهای فوق تابع شرایط محیطی است. بر این اساس در این رساله، مقادیر واقعی پارامترهای فوق تصحیح شده و تاثیرات آنها بر معادلات ترمودینامیکی نیز بررسی می‌شوند.

الف – شتاب ثقل واقعی کره زمین

شتاب ثقل واقعی کره زمین تابع اختلاف ارتفاع نقطه مورد نظر از سطح آب‌های آزاد است. بنابراین طبق رابطه ۳-۴۶ شتاب ثقل واقعی کره زمین توسط محققین اصلاح شده است (Cazenave, 1995).

$$g_o = 9.80665 \frac{m}{s^2}, \quad g = g_o \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \rightarrow g = g_o \left(\frac{6357000}{6357000+h} \right)^2 \quad (46-3)$$

g : شتاب ثقل واقعی کره زمین (متر بر مجذور ثانیه)

g_0 : شتاب ثقل مبنای کره زمین

h : اختلاف ارتفاع از سطح آب‌های آزاد (متر)

ب – بهبود اختلاف انرژی پتانسیل

با توجه به این که شتاب ثقل کره زمین متغیر است بنابراین اختلاف انرژی پتانسیل آن نیز متغیر می‌شود بر این اساس روابط ۲-۳۵ و ۲-۵۵ اصلاح شده و روابط ۳-۴۷ و ۳-۴۸ ارائه می‌شوند.

$$\Delta_{ep} = g_2 Z_2 - g_1 Z_1 \quad (47-3)$$

$$\Delta_{ep}^* = (g_2 Z_2 - g_1 Z_1) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2} \right) \quad (48-3)$$

ج – بهبود ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت

ظرفیت گرمایی ویژه واقعی هوا در فشار ثابت، تابع درجه حرارت محیط است. بنابراین این متغیر ثابت نیست. ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت و دمای مختلف در جدول ۳-۸ نشان داده شده است بر این اساس این متغیر اصلاح شده و نتیجه آن در رابطه ۳-۴۹ ارائه شده است.

د – بهبود ظرفیت گرمایی ویژه هوا در حجم ثابت

ظرفیت گرمایی ویژه واقعی هوا در حجم ثابت، تابع درجه حرارت محیط است بنابراین این

متغیر ثابت نیست. ظرفیت گرمایی ویژه هوا در حجم ثابت و دمای مختلف در جدول ۳-۹ نشان داده شده است بر این اساس این متغیر اصلاح شده و نتیجه آن در رابطه ۳-۵۰ ارائه شده است.

جدول ۳-۸- ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت و دمای مختلف (www.vacuumkaran.com)

دما	$^{\circ}K$	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت	$\frac{J}{kg^{\circ}K}$	۱۰۰۳	۱۰۰۵	۱۰۰۸

$$c_p = 1000 + 1.87 \times 10^{-7} T^3 \quad (۳-۴۹)$$

جدول ۳-۹- ظرفیت گرمایی ویژه هوا در حجم ثابت و دمای مختلف (www.vacuumkaran.com)

دما	$^{\circ}K$	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت	$\frac{J}{kg^{\circ}K}$	۷۱۶	۷۱۸	۷۲۱

$$c_v = 713 + 1.87 \times 10^{-7} T^3 \quad (۳-۵۰)$$

ه- بهبود اختلاف آنتالپی هوا

با توجه به این که ظرفیت گرمایی ویژه هوا تابع درجه حرارت محیط هست بر این اساس اختلاف آنتالپی هوای خشک نیز ثابت نبوده و متغیر است. بر این اساس روابط ۲-۴۰ و ۲-۶۰ اصلاح شده و روابط ۳-۵۱ و ۳-۵۲ ارائه می شوند.

$$h_{12} = c_{p2} t_{d2} - c_{p1} t_{d1} \quad (۳-۵۱)$$

$$h_{12}^* = c_{p2} t_{d2} - c_{p1} t_{d1} + w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \bar{h}_w \quad (۳-۵۲)$$

و- بهبود جرم حجمی خشک متوسط هوا

در علم ترمودینامیک همواره دبی جرمی هوا در طول مسیر حفاری مقداری ثابت است بر این اساس جرم حجمی خشک متوسط هوا طبق رابطه ۳-۵۳ اصلاح می شود.

$$M_1 = M_2 = M_3 \rightarrow \rho_{d1} V_{S1} = \rho_{d2} V_{S2} = \rho_d V_S$$

$$V = 0.5 \times (V_2 + V_1) \rightarrow \frac{M_3}{\rho_d S} = 0.5 \times \left(\frac{M_2}{\rho_{d2} S_2} + \frac{M_1}{\rho_{d1} S_1} \right) \rightarrow \frac{1}{\rho_d} = 0.5 \times \left(\frac{1}{\rho_{d2}} + \frac{1}{\rho_{d1}} \right)$$

$$\rho_d = \frac{2\rho_{d1}\rho_{d2}}{\rho_{d1} + \rho_{d2}} \quad (53-3)$$

۳-۴-۵- روش K-W

با توجه به بهبود معادلات ترمودینامیکی در بخش ۳-۴-۴ می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های دلتا و K نیازمند اصلاح هستند بر این اساس روش دیگری با نام K-W مطرح می‌شود. چون این روش برپایه روش K ارائه شده و قادر است مقدار رطوبت خروجی هوا را محاسبه کند بر این اساس نام این روش K-W نامگذاری شد. مراحل حل این روش به شرح ذیل و فلوچارت آن در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است.

الف- فرضیات اولیه

برای حل روش مطرح شده نیاز به یکسری فرضیاتی به شرح ذیل است:

$$\begin{aligned} V_2 &= 1.1V_1 \\ t_{d2} &= 1.1t_{d1} \\ c_{p2} &= 1.1c_{p1} \end{aligned} \quad (54-3)$$

$$w_2 = 1.1w_1 \quad (55-3)$$

ب- محاسبات اصلی

در این مرحله با توجه به قوانین ترمودینامیکی و تفکیک آن‌ها از هم سبب ایجاد ۱۴ معادله

شده که اصول محاسبات اصلی را برعهده گرفته و به شرح ذیل بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} \Delta_{ep} &= g_2 Z_2 - g_1 Z_1 \\ \Delta_{ek} &= \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) \\ \Delta_{ep}^* &= (g_2 Z_2 - g_1 Z_1) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) \\ \Delta_{ek}^* &= \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) \\ c &= w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \overline{h_w} \end{aligned} \quad (56-3)$$

$$t_{d2} = \frac{q_{12}^{-c+c} p_1 t_{d1} - \Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12}}{c_{p2}} \quad (57-3)$$

$$F_{12} = \frac{f}{2} \frac{LP}{S} \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 \quad (58-3)$$

$$K = \frac{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12}}{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} + R_d(t_{d2} - t_{d1}) + R_v(w_2 T_{d2} - w_1 T_{d1})} \quad (59-3)$$

$$\rho_{d2} = \rho_{d1} \left[\frac{(R_d + R_v w_2) T_{d2}}{(R_d + R_v w_1) T_{d1}} \right]^{\frac{1}{K-1}} \quad (60-3)$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{\rho_{d2}}{\rho_{d1}} \right)^K \quad (61-3)$$

$$c_{p2} = 1000 + 1.87 \times 10^{-7} T_{d2}^3 \quad (62-3)$$

$$w_2 = \frac{c_{p2} t_{d2} - c_{p1} t_{d1} - w_1 \bar{h}_{v1} + w_1 \bar{h}_w - q_{12} + (\Delta_{ep} + \Delta_{ek}) \left(1 + \frac{w_1}{2} \right) - W_{12}}{-h_{v2} + \bar{h}_w - 0.5(\Delta_{ep} + \Delta_{ek})} \quad (63-3)$$

$$V_2 = \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho_{d2}} \quad (64-3)$$

$$\Delta = \left| P_2^{n+1} - P_2^n \right| \quad (65-3)$$

ج- تکرار محاسبات

اگر مقدار دلتا در رابطه ۳-۶۵، کوچک‌تر یا مساوی مقدار دقت محاسبات شود در این صورت

حل مجدد ۱۴ معادله فوق متوقف شده و پایان عملیات انجام محاسبات اعلام می‌شود.

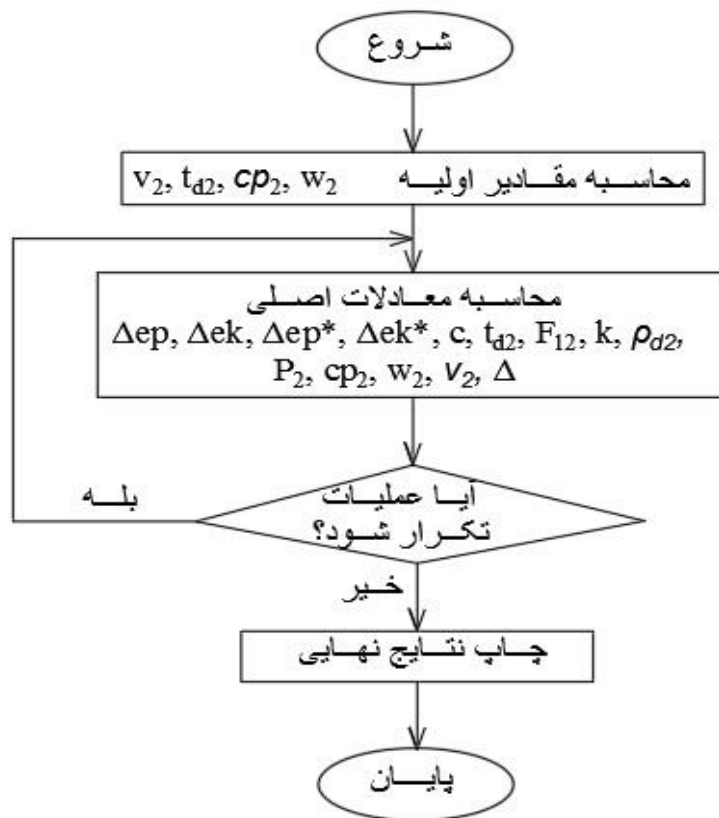
جهت درک بهتر روش K-W به مثال مطرح شده در بخش ۳-۴-۲ توجه شود. مرحله اول نتایج

این روش در تحلیل سیال تراکم پذیر برای هوای مرطوب به شرح ذیل و نتایج سایر مراحل آن با

استفاده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۳-۱۰ نشان داده شده است. طبق جدول

۳-۱۰ تعداد تکرار محاسبات ریاضی با فرض ۰/۰۰۱ دقت انجام محاسبات برابر ۵ تکرار می‌شود

همچنین از دیگر مزایای این روش محاسبه مقدار رطوبت خروجی است.



شکل ۳-۱۲ فلوجارت روش K-W

- مرحله اول محاسبات

$$V_2 = 1.1V_1 = 1.1 \times 7 = 7.7 \text{ m/s}$$

$$\Delta_{ek} = \frac{1}{2} \times (7.7^2 - 7^2) = 5.145 \text{ J/kg}$$

$$P_{vsd1} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27 t_{d1}}{237.3 + t_{d1}}\right), \quad t_{d1} = 30^{\circ\text{C}} \rightarrow P_{vsd1} = 4241.67572 \text{ Pa}$$

$$P_{v1} = P_{vsd1} R_{h1}, \quad R_{h1} = \%30 \rightarrow P_{v1} = 1060.41892 \text{ Pa}$$

$$w_1 = 0.622 \frac{P_{v1}}{P_1 - P_{v1}}, \quad P_1 = 97805.639 \text{ Pa} \rightarrow w_1 = 0.006818 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

$$w_2 = 1.1w_1 = 1.1 \times 0.006818 = 0.007499 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

$$\Delta_{ek}^* = \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) = 5.181831 \text{ J/kg}$$

$$g = g_o \left(\frac{6357000}{6357000 + h}\right)^2 \rightarrow g_1 = 9.797401 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad g_2 = 9.800482 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\Delta_{ep} = g_2 Z_2 - g_1 Z_1 = -9791.239 \text{ J/kg}$$

$$\Delta_{ep}^* = (g_2 Z_2 - g_1 Z_1) \left(1 + \frac{w_2 + w_1}{2}\right) = -9861.32871 \frac{J}{kg}$$

$$\rho_{d1} = \frac{P_1 - P_{v1}}{R_d T_{d1}} = 1.111807 \frac{kg}{m^3}$$

$$q_{12} = \frac{N}{\rho_{d1} V_1 S_1} = \frac{50 \times 1000}{1.111807 \times 7 \times 7.0686} = 908.885 \frac{J}{kg}$$

$$c_p = 1000 + 1.87 \times 10^{-7} T^3 \rightarrow c_{p1} = 1005.20979 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ K}$$

$$c_{p2} = 1.1 c_{p1} = 1105.730691 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ K}$$

$$t_{d2} = 1.1 t_{d1} = 33^{oc}$$

$$c = w_2 h_{v2} - w_1 h_{v1} - (w_2 - w_1) \bar{h}_w = 1692.65255$$

$$W_{12} = 0$$

$$t_{d2} = \frac{q_{12} - c + c_{p1} t_{d1} - \Delta_{ep}^* - \Delta_{ek}^* + W_{12}}{c_{p2}} \rightarrow t_{d2} = 35.4776^{oc}$$

$$F_{12} = \frac{f}{2} \frac{LP}{S} \left(\frac{V_1 + V_2}{2}\right)^2 = 720.299960 \frac{J}{kg}$$

$$K = \frac{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12}}{F_{12} + \Delta_{ep}^* + \Delta_{ek}^* - W_{12} + R_d (t_{d2} - t_{d1}) + R_v (w_2 T_{d2} - w_1 T_{d1})} = 1.226417$$

$$\rho_{d2} = \rho_{d1} \left[\frac{(R_d + R_v w_2) T_{d2}}{(R_d + R_v w_1) T_{d1}} \right]^{\frac{1}{K-1}} = 1.209086 \frac{kg}{m^3}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{\rho_{d2}}{\rho_{d1}}\right)^K = 108402.492141 \text{ Pa}$$

$$c_{p2} = 1000 + 1.87 \times 10^{-7} T_{d2}^3 = 1005.49725 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ K}$$

$$w_2 = \frac{c_{p2} t_{d2} - c_{p1} t_{d1} - w_1 h_{v1} + w_1 \bar{h}_w - q_{12} + (\Delta_{ep} + \Delta_{ek}) \left(1 + \frac{w_1}{2}\right) - W_{12}}{-h_{v2} + \bar{h}_w - 0.5(\Delta_{ep} + \Delta_{ek})}$$

$$\rightarrow w_2 = 0.008955 \frac{kg}{kg}$$

$$V_2 = \frac{V_1 S_1 \rho_{d1}}{S_2 \rho_{d2}} = 6.436807 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

جدول ۳-۱۰ نتایج روش K-W برای طراحی تهویه هوای مرطوب تراکم پذیر توسط Ventilation Design

شرح	تکرار ۱	تکرار ۲	تکرار ۳	تکرار ۴	تکرار ۵
Δ_{ek}^*	۵/۱۸۱۸۳۱	-۳/۸۱۳۵۹۷	-۳/۷۷۴۰۹۰	-۳/۷۷۳۸۲۴	-۳/۷۷۳۸۲۲
Δ_{ep}^*	-۹۸۶۱/۳۲۸۷۶۱	-۹۸۶۸/۴۵۳۴۱۶	-۹۸۶۸/۴۵۳۱۶۹	-۹۸۶۸/۴۵۳۱۷۰	-۹۸۶۸/۴۵۳۱۷۰
t_{d2}	۳۵/۴۷۷۶	۳۵/۴۸۶۵۵۰	۳۵/۴۸۶۵۱۱	۳۵/۴۸۶۵۱۰	۳۵/۴۸۶۵۱۰
F_{12}	۷۲۰/۲۹۹۹۶۰	۶۰۱/۸۲۵۹۲۰	۶۰۲/۳۷۱۲۷۶	۶۰۲/۳۷۴۹۵۰	۶۰۲/۳۷۴۹۷۵
k	۱/۲۲۶۴۱۷	۱/۲۵۷۱۹۳	۱/۲۵۷۲۱۰	۱/۲۵۷۲۱۰	۱/۲۵۷۲۱۰
ρ_{d2}	۱/۲۰۹۰۸۶	۱/۲۰۷۹۴۳	۱/۲۰۷۹۳۶	۱/۲۰۷۹۳۶	۱/۲۰۷۹۳۶
P_2	۱۰۸۴۰۲/۴۹۲	۱۰۸۵۵۳/۶۱۷	۱۰۸۵۵۲/۹۰۴	۱۰۸۵۵۲/۸۹۹	۱۰۸۵۵۲/۸۹۹
c_{p2}	۱۰۰۵/۴۹۷۲۵۵	۱۰۰۵/۴۹۷۷۳۳	۱۰۰۵/۴۹۷۷۳۱	۱۰۰۵/۴۹۷۷۳۱	۱۰۰۵/۴۹۷۷۳۱
V_2	۶/۴۳۶۸۰۷	۶/۴۴۲۸۹۴	۶/۴۴۲۹۳۵	۶/۴۴۲۹۳۵	۶/۴۴۲۹۳۵
w_2	۰/۰۰۸۹۵۵	۰/۰۰۸۹۵۵	۰/۰۰۸۹۵۵	۰/۰۰۸۹۵۵	۰/۰۰۸۹۵۵
R_{h2}	۰/۲۶۶۵۹۴	۰/۲۶۶۸۳۳	۰/۲۶۶۸۳۲	۰/۲۶۶۸۳۲	۰/۲۶۶۸۳۲

۳-۵- برنامه رایانه‌ای Ventilation Design

تا کنون در علم تهویه معادن، نرم‌افزارهای متعددی ارائه شده که هر یک براساس یک روش خاصی تحلیل شبکه تهویه معادن را انجام می‌دهند و نرم‌افزاری که قادر باشد اکثر تئوری‌های مطرح شده در علم تهویه را تحت پوشش خود قرار دهد خیلی کم است. بنابراین در این رساله برای طراحی تهویه معادن در مدل‌های تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری هوا از روش‌های مختلفی که در فصول دوم و سوم ارائه شده استفاده کرده تا ۱۰ روش مختلف در تحلیل مدل تراکم‌ناپذیری و ۴ روش مختلف در تحلیل تراکم‌پذیری با اهمیت واقع شود. بر این اساس جهت تسریع انجام محاسبات ریاضی و کاهش خطای محاسبات انسانی برای این ۱۴ روش در طراحی تهویه معادن لازم است از رایانه استفاده شود. بنابراین ارائه برنامه رایانه‌ای در این رساله تحت عنوان Ventilation Design امری ضروری محسوب می‌شود. این برنامه رایانه‌ای ابتدا به زبان برنامه‌نویسی C++ نوشته شد سپس با استفاده از نرم‌افزار

Visual C++ 6 تحت ویندوز تبدیل شده است. برای استفاده از این برنامه رایانه‌ای بایستی مراحل زیر انجام شود:

الف- آماده‌سازی ورودی‌های برنامه به صورت فایل متنی

ب- وارد کردن داده‌ها

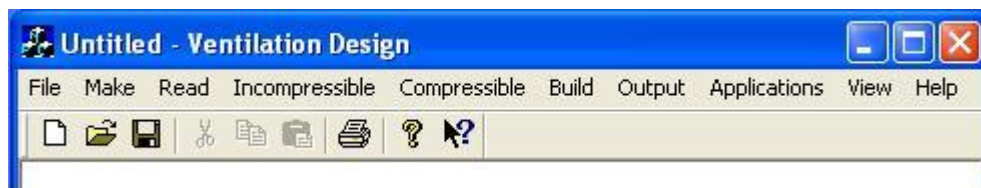
ج- انتخاب روش‌های مختلف طراحی تهویه معادن در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری

د- اجرای برنامه

ه- دیدن نتایج

۳-۵-۱- پنجره اصلی برنامه رایانه‌ای

طبق شکل ۳-۱۳، پنجره اصلی این برنامه از ۱۰ دستور مختلف تشکیل شده است که هر یک اهداف خاص خود را دنبال می‌کند.



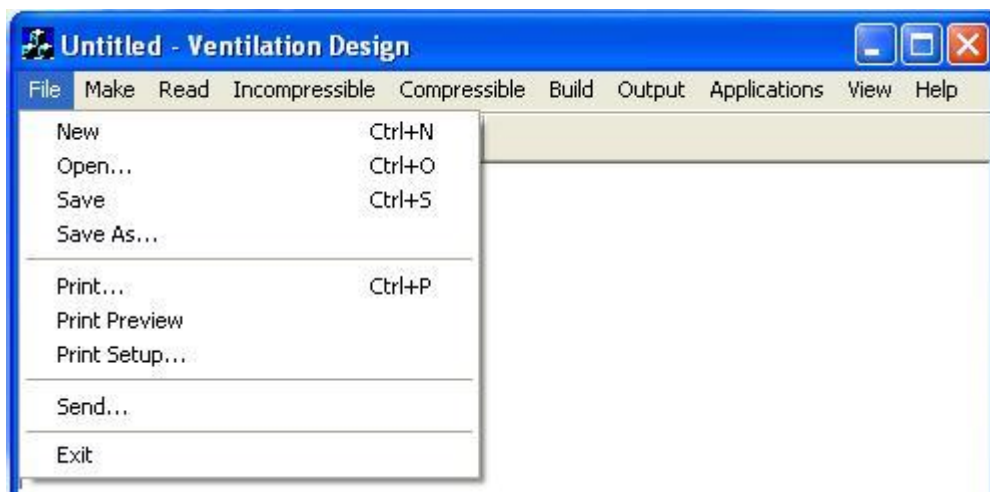
شکل ۳-۱۳ پنجره اصلی برنامه رایانه‌ای Ventlation Design

۳-۵-۲- دستور File

عملکرد دستور File در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. از این دستور برای ایجاد فایل جدید (New)، بازکردن فایل‌ها (Open)، ذخیره فایل‌ها (Save, Save as)، چاپ اطلاعات (Print) و دستور خروج از برنامه (Exit) تعریف شده است.

۳-۵-۳- دستور Make

عملکرد دستور Make در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است. از این دستور برای ایجاد فایل متنی در محیط Notepad استفاده می‌شود.



شکل ۳-۱۴ عملکرد دستور File



شکل ۳-۱۵ عملکرد دستور Make

۳-۵-۴- دستور Read

عملکرد دستور Read در شکل‌های ۳-۱۶ و ۳-۱۷ نشان داده شده است. از این دستور برای خواندن فایل‌های متنی در دو مدل Classic و Optimum استفاده می‌شود. در مدل کلاسیک نیاز به ساخت سه فایل متنی گره (Junction File)، شاخه (Branch File) و حلقه (Ring File) است. برای کاهش حجم داده‌های ورودی توسط کاربر به برنامه مذکور، مدل اپتیموم طراحی شده است. در مدل اپتیموم نیاز به ساخت دو فایل متنی (Junction File) و شاخه (Branch File) است. در پایان نیز دقت انجام محاسبات ریاضی (Accuracy) تعریف شده است. نمونه‌ای از انواع فایل‌های متنی در

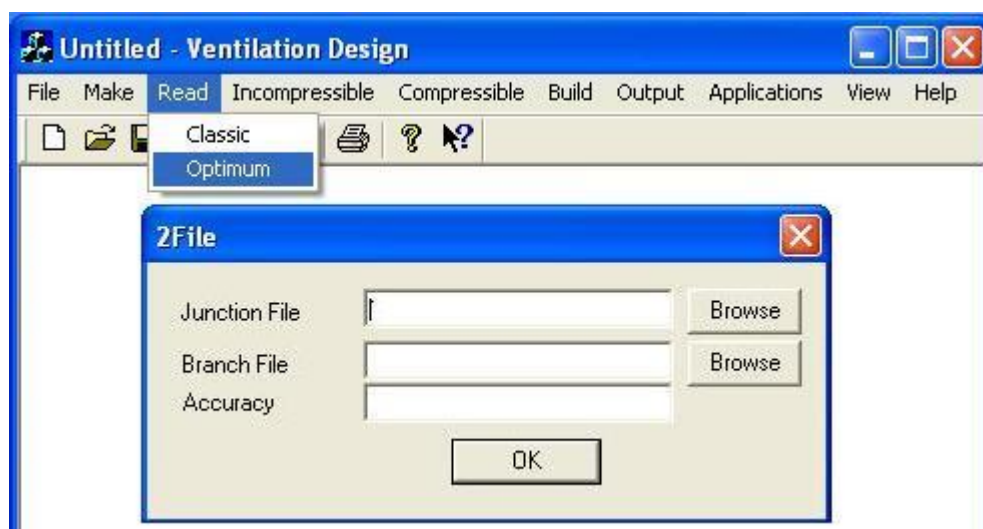
پیوست شماره ۱ تا ۳ ارائه شده است. برای درک بهتر از تهیه انواع فایل‌های مورد نیاز در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design مطابق جداول ۳-۱۱ تا ۳-۱۴ عمل شود.

الف- طرز ساخت فایل گره

این فایل از دو ستون با نام شماره گره و کد گره تشکیل شده و تعداد ردیف‌های آن متناسب با تعداد گره در شبکه تهویه است. لازم به ذکر است اگر گره زیرزمینی باشد کد آن ۱ و اگر سطحی باشد کد آن ۲ است. فایل گره مربوط به شکل ۳-۲ در جدول ۳-۱۱ ارائه شده است.



شکل ۳-۱۶ عملکرد دستور Read-Classic



شکل ۳-۱۷ عملکرد دستور Read-Optimum

جدول ۱۱-۳ فایل گره مربوط به شکل ۲-۳

	کد گره	شماره گره
a:۱	۲	۱
b:۲	۱	۲
c:۳	۲	۳
d:۴	۲	۴

ب- طرز ساخت فایل شاخه در مدل کلاسیک

این فایل از پنج ستون مختلف، مطابق جدول ۱۲-۳ نام‌گذاری شده و تعداد ردیف‌های آن متناسب با تعداد شاخه در شبکه تهویه است. فایل شاخه در مدل کلاسیک مربوط به شکل ۲-۳ در جدول ۱۲-۳ نشان داده شده است. اگر جهت جریان بادبزن هم‌جهت جریان حلقه باشد در این صورت فشار بادبزن با علامت مثبت در غیر این صورت با علامت منفی مشخص می‌شود.

جدول ۱۲-۳ فایل شاخه در مدل کلاسیک مربوط به شکل ۲-۳

فشار استاتیکی فن (میلیمتر آب)	شدت جریان حجمی فرضی (متر مکعب بر ثانیه)	مقاومت شاخه (کیلومورگ)	گره انتهایی شاخه	گره ابتدایی شاخه
۰	۴	۰/۵	۲	۱
۸۰	۲	۱	۲	۳
-۱۰۰	۶	۰/۷۵	۴	۲

ج- طرز ساخت فایل شاخه در مدل اپتیموم

این فایل از چهار ستون مختلف، مطابق جدول ۱۳-۳ نام‌گذاری شده و تعداد ردیف‌های آن متناسب با تعداد شاخه در شبکه تهویه است. فایل شاخه در مدل اپتیموم مربوط به شکل ۲-۳ در جدول ۱۳-۳ نشان داده شده است.

د- طرز ساخت فایل حلقه

این فایل از ستون‌ها و ردیف‌های مختلف تشکیل شده که تعداد ستون‌های آن متناسب با تعداد شاخه‌های شبکه تهویه و تعداد ردیف‌های آن متناسب با تعداد حلقه‌های مفید در شبکه تهویه است.

لازم به ذکر است اولاً اگر جهت جریان هر شاخه هم جهت با جهت حلقه باشد در این صورت کد (۱)، ثانیاً اگر خلاف جهت باشد کد (۱-) و ثالثاً اگر بی‌تاثیر باشد کد (۰) در فایل حلقه منظور می‌شود. بر این اساس فایل حلقه مربوط به شکل ۲-۳ در جدول ۳-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۱۳ فایل شاخه در مدل اپتیموم مربوط به شکل ۲-۳

گره ابتدای شاخه	گره انتهای شاخه	مقاومت شاخه (کیلومورگ)	فشار استاتیکی فن (میلیمتر آب)
۱	۲	۰/۵	۰
۳	۲	۱	۸۰
۲	۴	۰/۷۵	-۱۰۰

جدول ۳-۱۴ فایل حلقه مربوط به شکل ۲-۳

شاخه (۲-۴)	شاخه (۲-۳)	شاخه (۲-۱)	شرح
۰	۱	-۱	حلقه ۱
۱	۰	۱	حلقه ۲

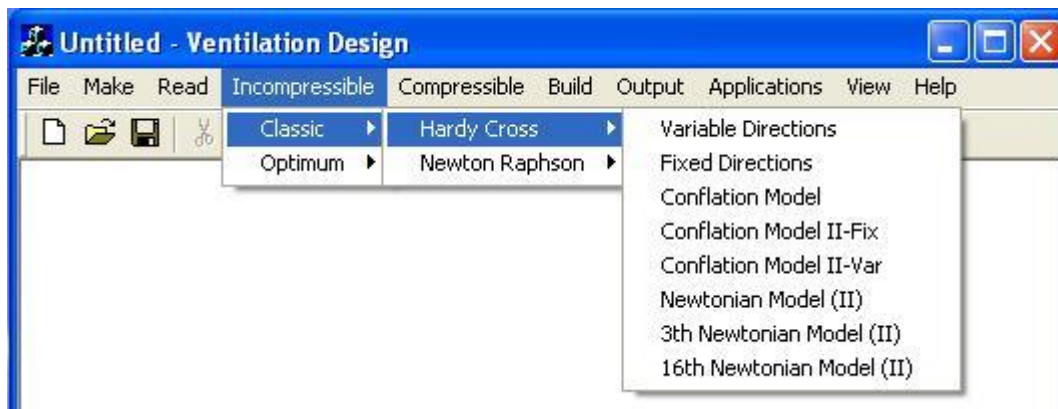
۳-۵-۵- Incompressible دستور

عملکرد دستور Incompressible در شکل‌های ۳-۱۸ تا ۳-۲۰ نشان داده شده است. از این دستور برای طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری سیال هوا در دو مدل کلاسیک و اپتیموم استفاده می‌شود. در مدل کلاسیک انواع روش‌های هاردی کراس و نیوتن-رافسون تعریف شده که شرح آن‌ها در فصل‌های دوم و سوم مطرح شده است اما در مدل اپتیموم فقط روش نیوتن-رافسون بدون مشتق به عنوان سریع‌ترین و بهترین روش برای طراحی تهویه معادن تعریف شده است.

الف- روش‌های هاردی کراس در مدل کلاسیک

طبق شکل ۳-۱۸، این دستور برای ۸ روش هاردی کراس (Hardy Cross) ارائه شده که به ترتیب شامل روش هاردی کراس (Variable Directions)، مدل ونگ (Fixed Directions)، مدل تلفیقی (Conflation Model)، دومین مدل تلفیقی با جهت‌های ثابت (Conflation Model II-Fix)، دومین مدل تلفیقی با جهت‌های متغیر (Conflation Model II-Var)، مدل نیوتنی اصلاح شده

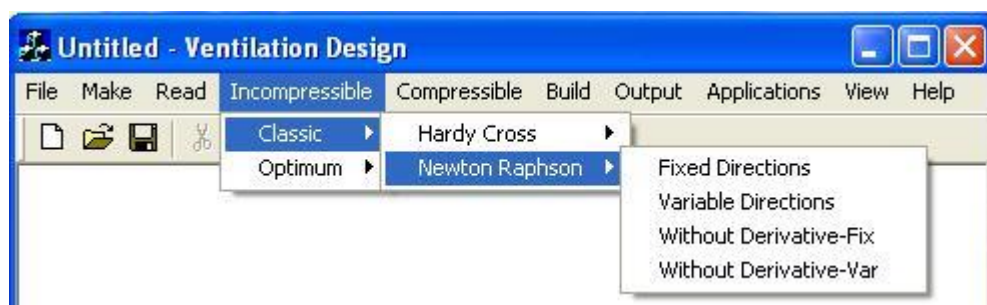
(Newtonian Model II)، مرتبه سوم مدل نیوتنی اصلاح شده (3th Newtonian Model II) و مرتبه شانزدهم مدل نیوتنی اصلاح شده (16th Newtonian Model II) تعریف شده است.



شکل ۳-۱۸ عملکرد دستور Incompressible-Classic-Hardy Cross

ب- روش‌های نیوتن-رافسون در مدل کلاسیک

طبق شکل ۳-۱۹، این دستور برای ۴ روش نیوتن-رافسون (Newton- Raphson) ارائه شده که به ترتیب شامل روش‌های نیوتن-رافسون مدل ونگ (Fixed Directions)، مدل جهت‌های متغیر (Variable Directions)، مدل بدون مشتق با جهت‌های ثابت (without Derivative-Fix) و مدل بدون مشتق با جهت‌های متغیر (without Derivative-Var) تعریف شده است.



شکل ۳-۱۹ عملکرد دستور Incompressible-Classic-Newton Raphson

ج- روش نیوتن-رافسون در مدل اپتیموم

طبق شکل ۳-۲۰، این دستور برای روش نیوتن-رافسون بدون مشتق با جهت‌های ثابت (without Derivative-Fix) تعریف شده است.



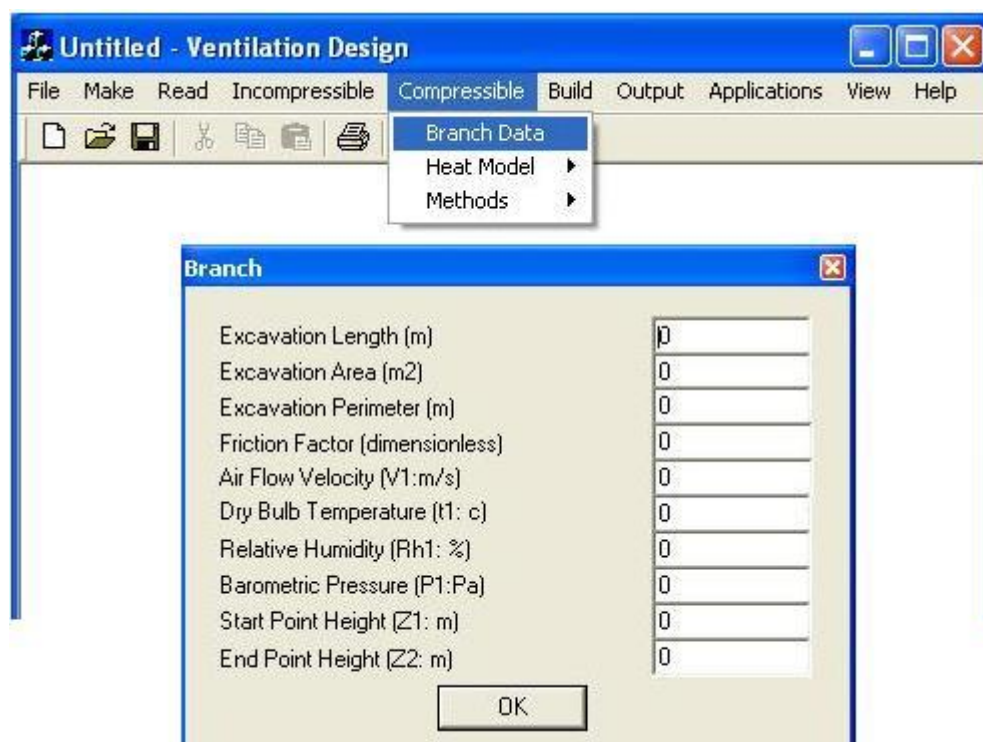
شکل ۳-۲۰ عملکرد دستور Incompressible-Optimum-Newton Raphson

۳-۵-۶- دستور Compressible

عملکرد دستور Compressible در شکل‌های ۳-۲۱ تا ۳-۳۴ نشان داده شده است. از این دستور برای طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌پذیری سیال هوا استفاده می‌شود. در این دستور اطلاعات مورد نیاز شاخه، تعریف مدل گرمایی و روش حل مدل گرمایی تعریف می‌شود.

الف- اطلاعات شاخه (Branch Data)

طبق شکل ۳-۲۱، این دستور برای پذیرش اطلاعات شاخه در شبکه تهویه تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل طول حفاری (Excavation Length)، سطح مقطع حفاری (Excavation Area)، محیط مقطع حفاری (Excavation Perimeter)، ضریب اصطکاک بدون بعد (Friction Factor (dimensionless))، سرعت هوای ورودی (Air Flow Velocity)، دمای خشک هوای ورودی (Dry Bulb Temperature)، رطوبت نسبی هوای ورودی (Relative Humidity)، فشار هوای ورودی (Barometric Pressure)، ارتفاع نقطه شروع حفاری (Start Point Height) و ارتفاع نقطه انتهای حفاری (End Point Height) است.



شکل ۳-۲۱ عملکرد دستور Compressible-Branch Data

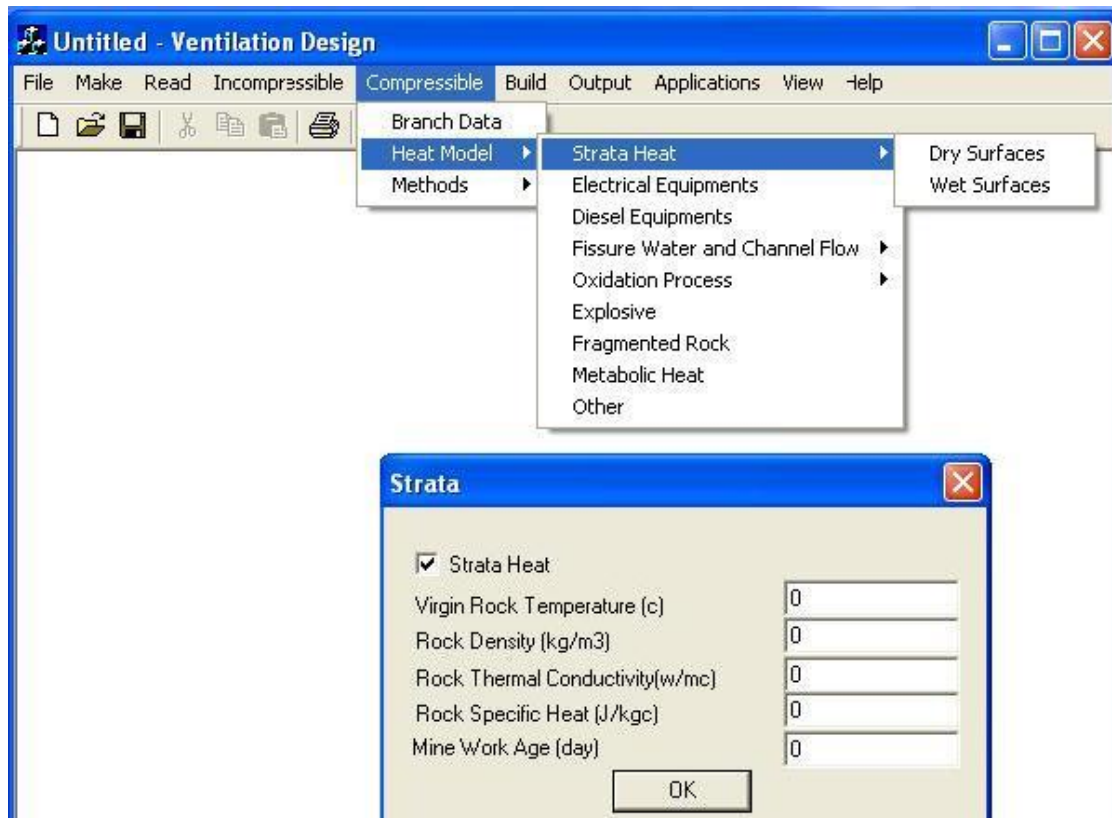
ب- انواع مدل گرما (Heat Model)

طبق شکل ۳-۲۲، در این دستور مدل‌های مختلف محاسبه مقدار گرمای تولید شده از حفريات معدنی (Strata Heat)، تجهیزات الکتریکی (Electrical Equipments)، تجهیزات دیزلی (Diesel Equipments)، آب درون منبع آب و مجاری باز (Fissure Water and Channel Flow)، اکسایش مواد معدنی (Oxidation Process)، مواد منفجره (Explosive)، حمل و نقل سنگ‌های خرد شده (Fragmented Rock)، پرسنل (Metabolic Heat) و سایر موارد (Other) تعریف شده است. کلیه روابط حاکم در این دستورات از منابع (مدنی، ۱۳۸۲، McPherson, 1993) استفاده شده است.

ج- انتقال گرما از حفريات معدنی (Strata Heat)

طبق شکل ۳-۲۲، این دستور برای برآورد انتقال گرما از حفريات معدنی به صورت جریان شعاعی طبق قانون گرمای فوریه به پیوست شماره‌های ۱۶ تا ۲۱ در دو مدل خشک و مرطوب تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل دمای بکر سنگ (Virgin Rock Temperature)، چگالی

سنگ (Rock Density)، رسانایی حرارتی سنگ (Rock Thermal Conductivity)، ظرفیت حرارتی ویژه سنگ (Rock Specific Heat) و عمر حفاری (Mine Work Age) است.



شکل ۳-۲۲ عملکرد دستور Strata Heat- Compressible-Heat Model

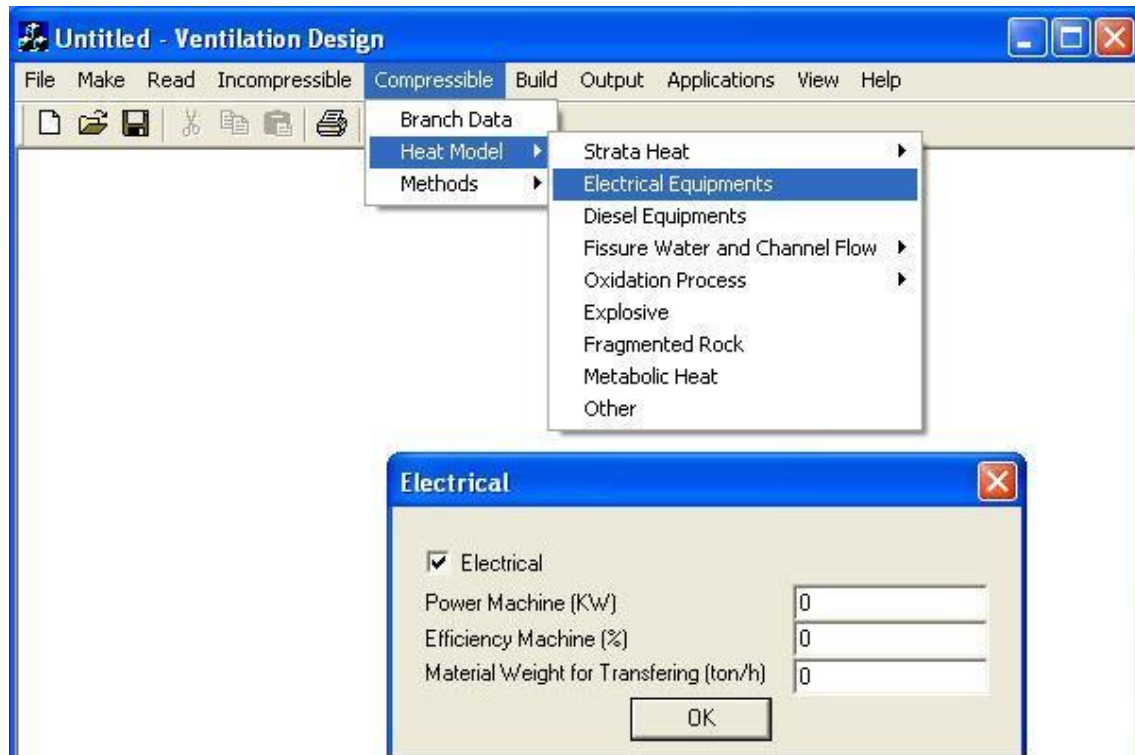
د- گرمای حاصل از تجهیزات الکتریکی (Electrical Equipments)

طبق شکل ۳-۲۳، این دستور برای برآورد گرمای حاصل از تجهیزات الکتریکی تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل توان ماشین الکتریکی (Power Machine)، راندمان کل ماشین الکتریکی (Efficiency Machine) و وزن مواد جابجا شده توسط ماشین الکتریکی (Material Weight for Transferring) است.

ه- گرمای حاصل از تجهیزات دیزلی (Diesel Equipments)

طبق شکل ۳-۲۴، این دستور برای برآورد گرمای حاصل از تجهیزات دیزلی تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل حجم گازوئیل مصرفی (Volume of Diesel Fuel)، راندمان کل ماشین دیزلی (Efficiency Machine) و حجم بخار آب تولید شده توسط ماشین دیزلی (Volume of) است.

(Water Vapor) است. روابط حاکم در این دستور از منابع (مدنی، ۱۳۸۲، McPherson, 1993) استفاده شده است.



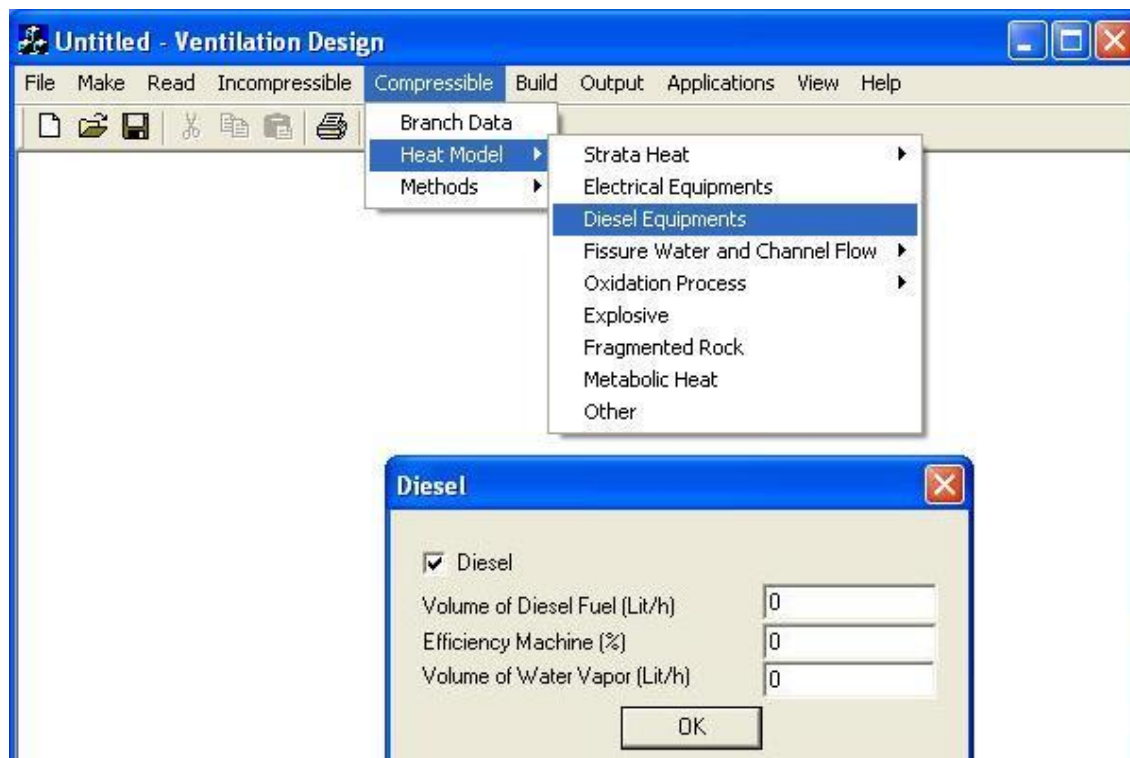
شکل ۳-۲۳ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Electrical

و- گرمای حاصل از ایستگاه منبع آب (Water Sump)

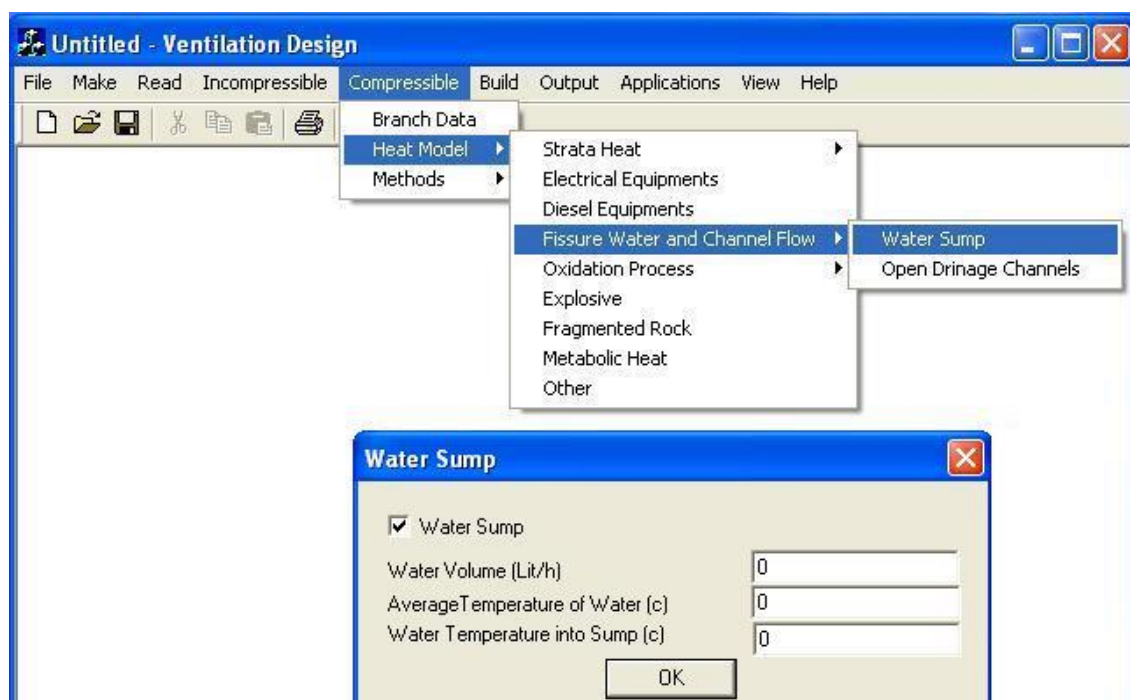
طبق شکل ۳-۲۵، این دستور برای برآورد گرمای حاصل از ایستگاه منبع آب تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل حجم آب (Water Volume)، دمای متوسط آب (Average Temperature of Water) و دمای آب درون منبع (Water Temperature) است.

ز- گرمای حاصل از آب درون مجاری باز (Open Drainage Channel)

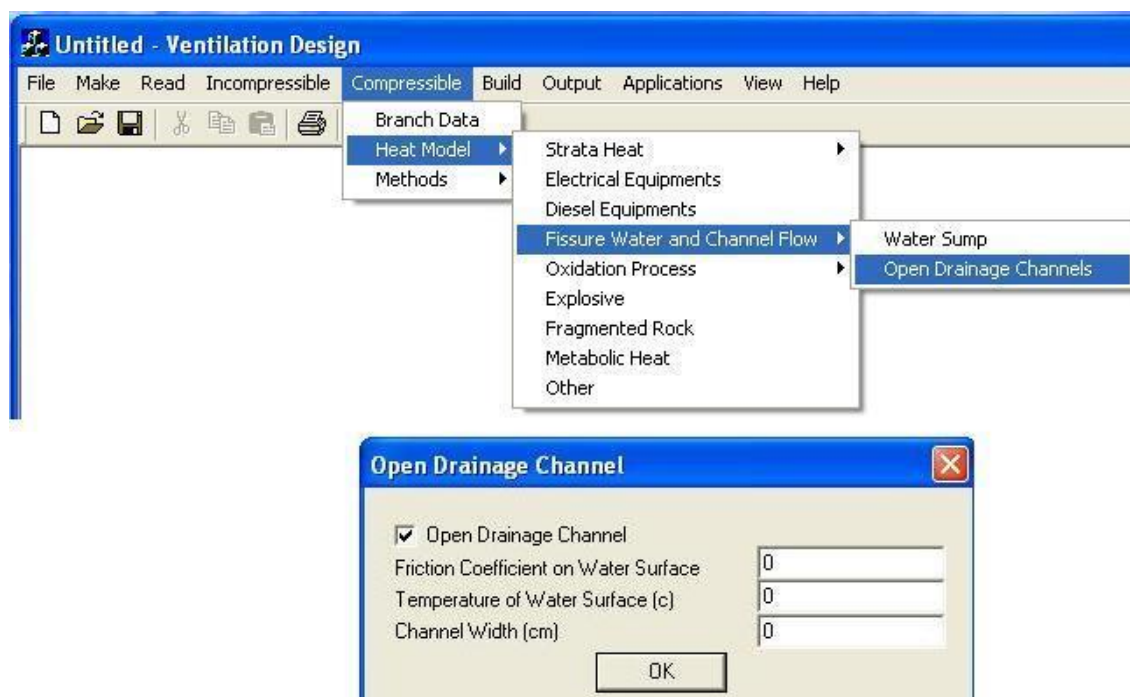
طبق شکل ۳-۲۶، این دستور برای برآورد گرمای حاصل از آب درون مجاری باز تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل ضریب اصطکاک با سطح آب (Friction Coefficient on Water Surface)، دمای سطح آب (Temperature of Water Surface) و عرض مجاری باز (Channel Width) است.



شکل ۳-۲۴ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Diesel



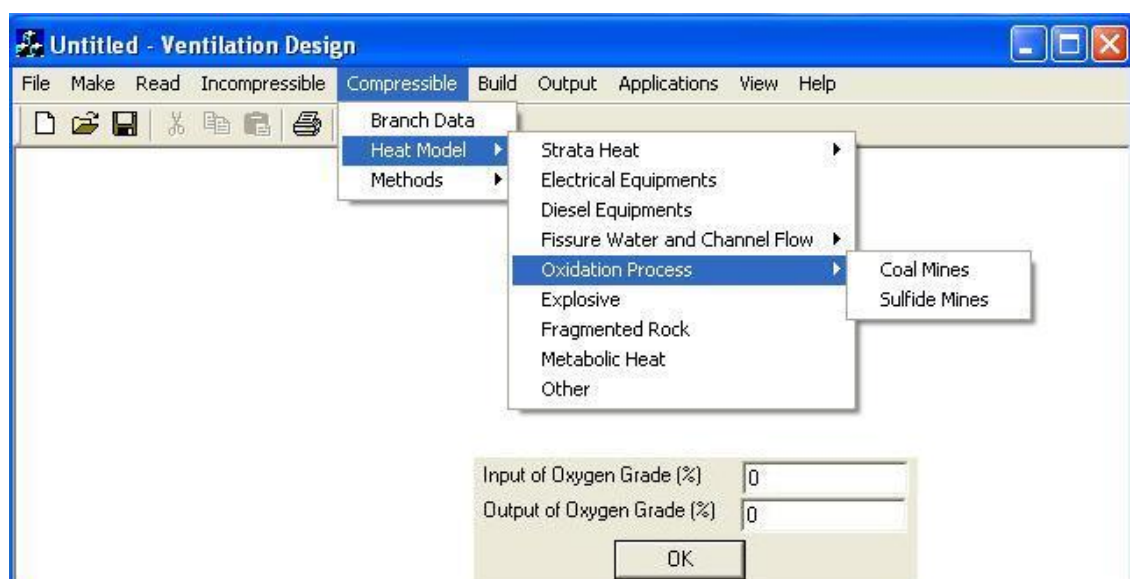
شکل ۳-۲۵ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Water Sump



شکل ۳-۲۶ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Open Drainage Channels

ح- گرمای حاصل از اکسایش مواد معدنی (Oxidation Process)

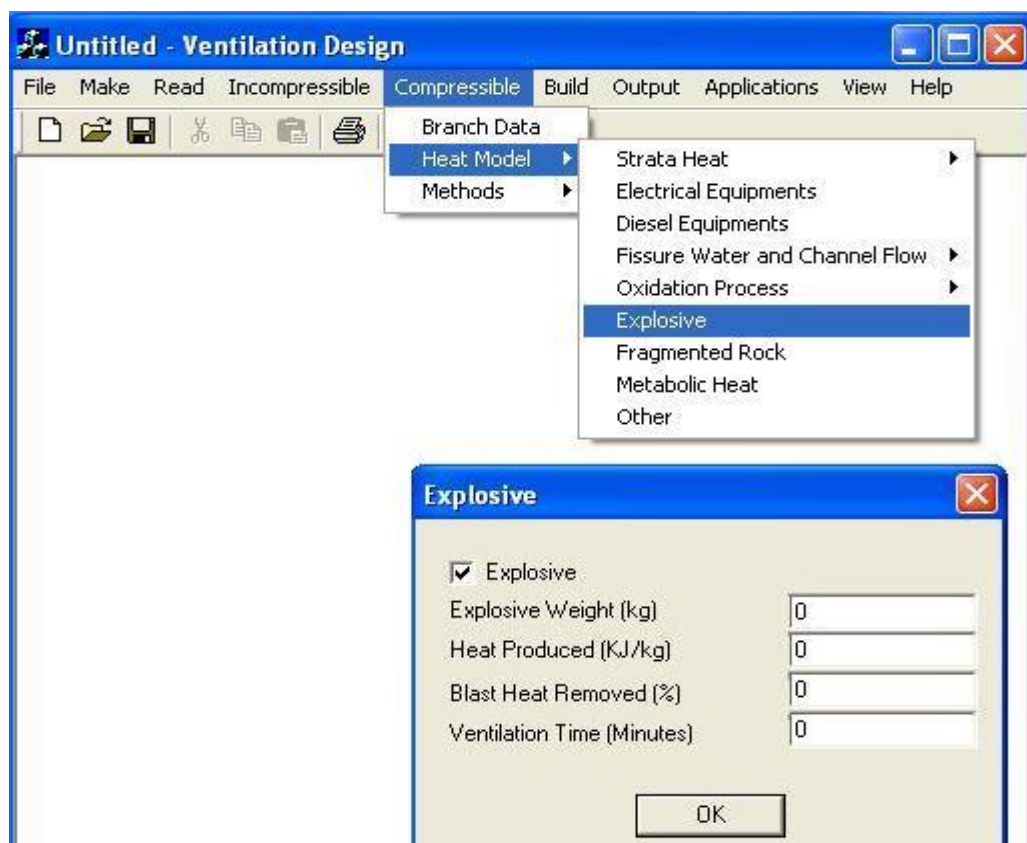
طبق شکل ۳-۲۷، این دستور برای برآورد گرمای حاصل از اکسایش مواد معدنی در معادن زغالسنگ و سولفیدی تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل عیار اکسیژن هوای ورودی (Input of Oxygen Grade) و خروجی هوا (Output of Oxygen Grade) است.



شکل ۳-۲۷ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Oxidation Process

ط – گرمای حاصل از انفجار مواد منفجره (Explosive)

طبق شکل ۳-۲۸، این دستور برای برآورد گرمای حاصل از انفجار مواد منفجره تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل وزن ماده منفجره (Explosive Weight)، مقدار گرمای تولید شده از ماده منفجره (Heat Produced)، درصد گرمای دفع شده در هنگام تهویه فرعی (Blast Heat Removed) و زمان تهویه فرعی (Ventilation Time) است.

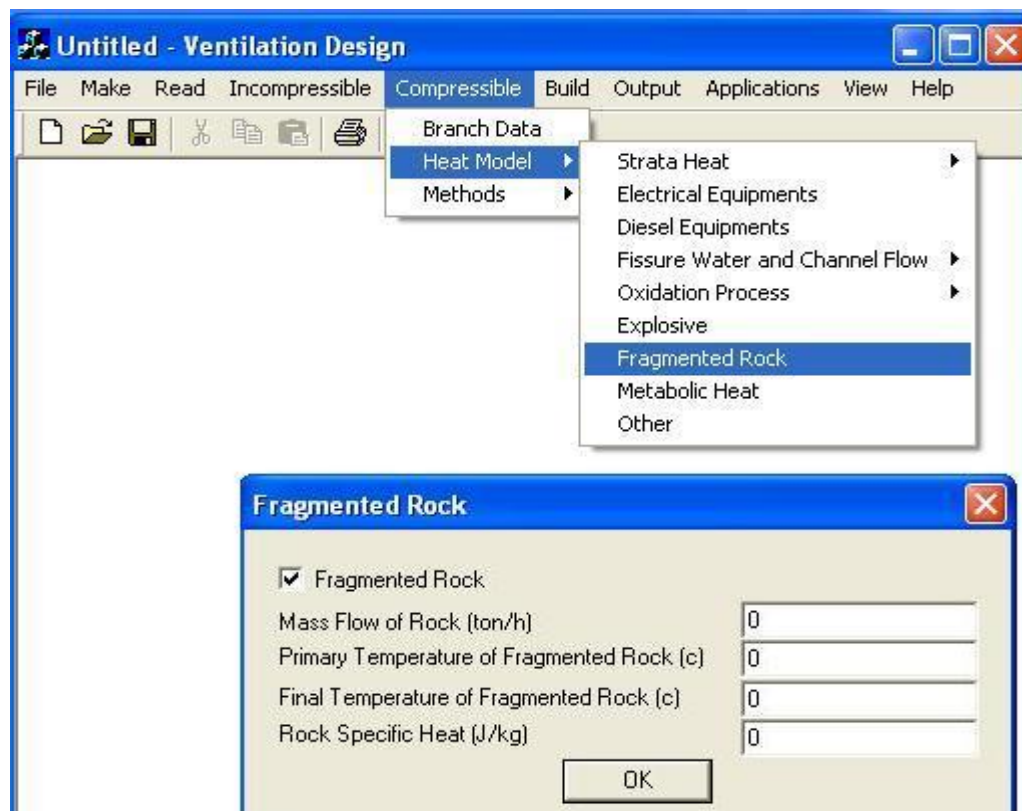


شکل ۳-۲۸ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Explosive

ی – گرمای حاصل از حمل و نقل سنگ‌های خرد شده (Fragmented Rock)

طبق شکل ۳-۲۹، این دستور برای برآورد گرمای حاصل از حمل و نقل سنگ‌های خرد شده تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل دبی جرمی سنگ خرد شده (Mass Flow of Rock)، دمای اولیه سنگ خرد شده (Primary Temperature of Fragmented Rock)، دمای نهایی سنگ خرد شده (Final Temperature of Fragmented Rock) و ظرفیت حرارتی ویژه سنگ (Rock) است.

Specific Heat) است.



شکل ۳-۲۹ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Fragmented Rock

ک- گرمای حاصل از پرسنل (Metabolic)

طبق شکل ۳-۳۰، این دستور برای برآورد گرمای حاصل از فعالیت بدنی پرسنل تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل تعداد نفرات (Personal Number) و گرمای حاصل شده از هر نفر (Metabolic Heat Production) است.

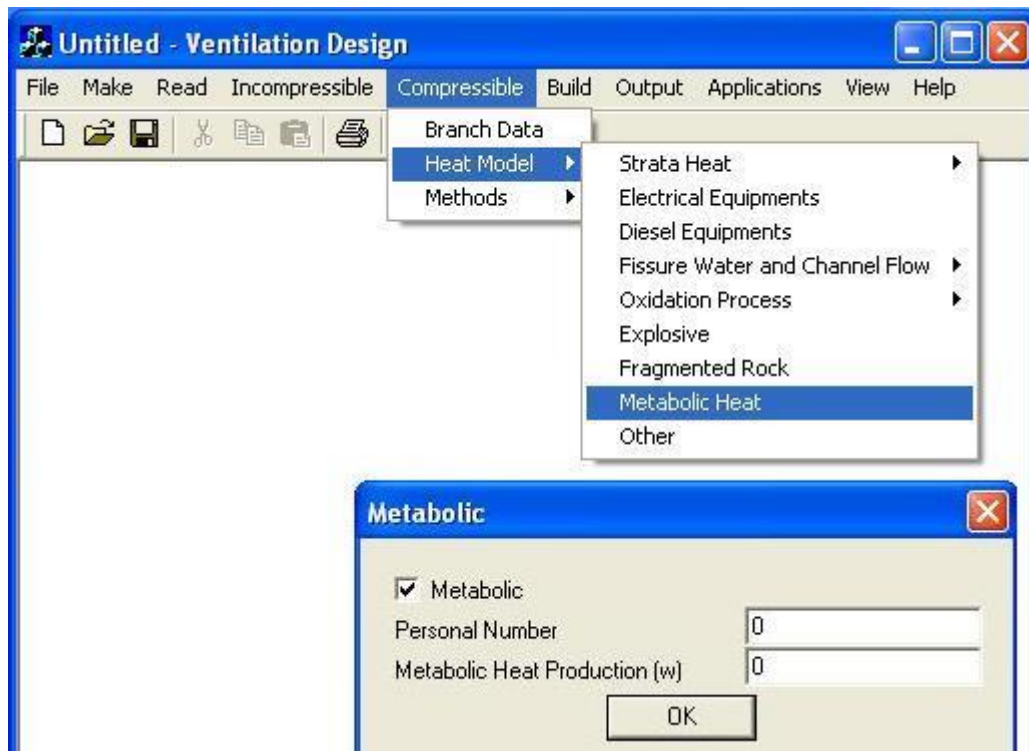
ل- سایر موارد (Other)

طبق شکل ۳-۳۱، این دستور برای سایر اطلاعات مورد نیاز جهت برآورد گرما تعریف شده است. این اطلاعات به ترتیب شامل نرخ تبخیر بخار آب (Vaporization Rate)، ضریب همزمانی مسائل گرما (Simultaneity Coefficient) و توان بادبزنی (Powe Fan) است.

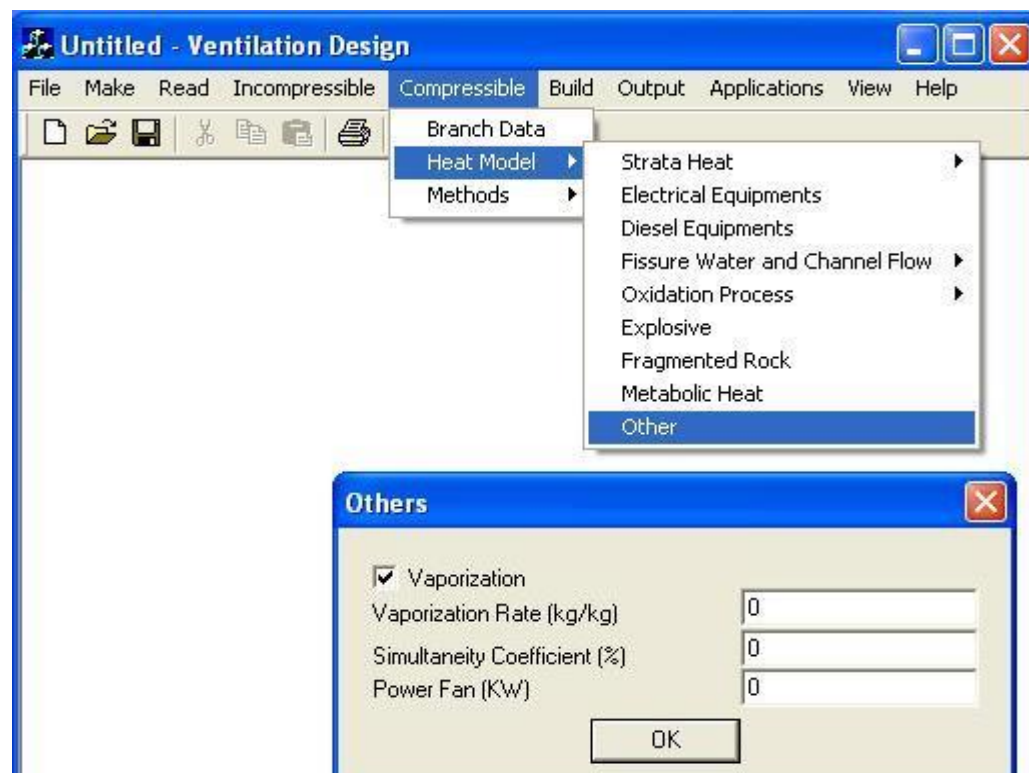
م- روش تحلیل هوای خشک (Dry Model)

طبق شکل ۳-۳۲، این دستور برای تحلیل تهویه‌ی هوای خشک تراکم‌پذیر تعریف شده است

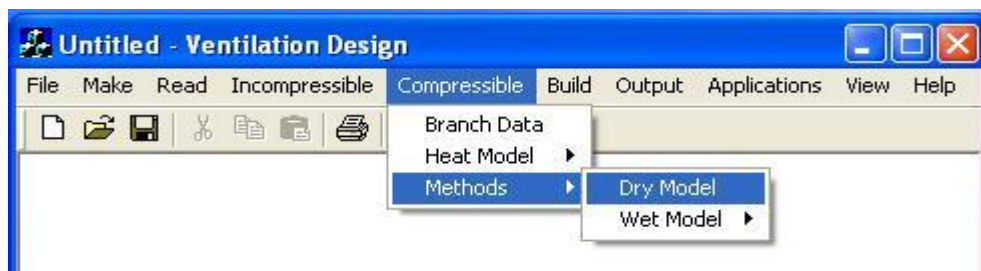
که اصول آن در بخش ۲-۳-۱ بیان شده است.



شکل ۳-۳۰ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Metabolic Heat



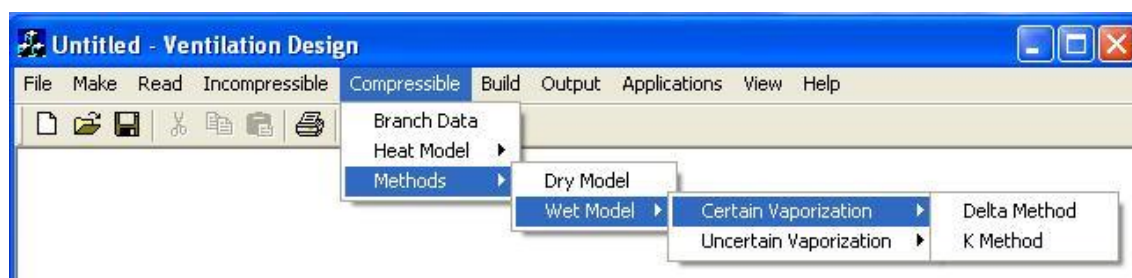
شکل ۳-۳۱ عملکرد دستور Compressible-Heat Model- Other



شکل ۳-۳۲ عملکرد دستور Compressible-Methods-Dry Model

ن- روش تحلیل هوای مرطوب- مدل اول (Certain Vaporization)

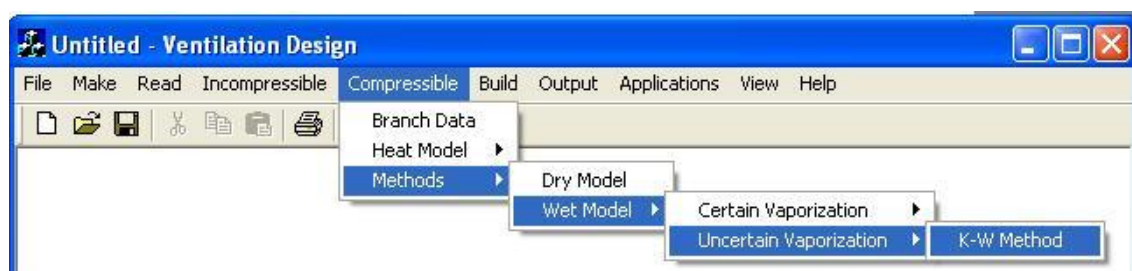
طبق شکل ۳-۳۳، این دستور برای تحلیل تهویه‌ی هوای مرطوب تراکم‌پذیر با معلوم بودن نرخ تبخیر بخار آب تعریف شده است که شامل دو روش دلتا و K است. اصول این دو روش در بخش‌های ۳-۳-۱ و ۳-۳-۲ بیان شده است.



شکل ۳-۳۳ عملکرد دستور Compressible-Methods-Certain Vaporization

ص- روش تحلیل هوای مرطوب- مدل دوم (Uncertain Vaporization)

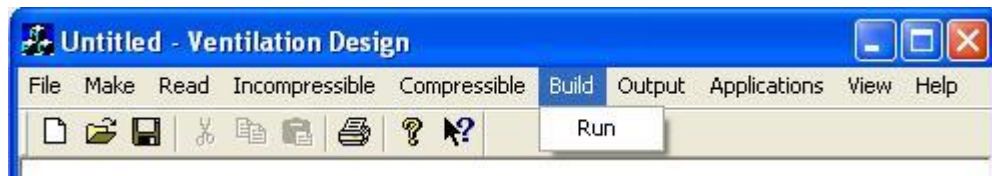
طبق شکل ۳-۳۴، این دستور برای تحلیل تهویه‌ی هوای مرطوب تراکم‌پذیر با نامشخص بودن نرخ تبخیر بخار آب تعریف شده است که شامل روش K-W است. اصول این روش در بخش ۳-۲-۱ و ۳-۳-۴ بیان شده است.



شکل ۳-۳۴ عملکرد دستور Compressible-Methods-Uncertain Vaporization

۳-۵-۷- دستور Build

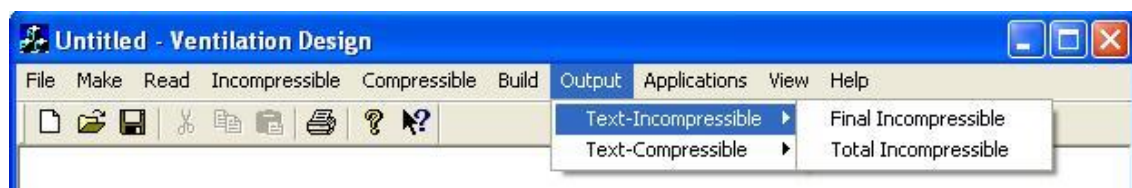
عملکرد دستور Build در شکل ۳-۳۵ نشان داده شده است. از این دستور برای اجرای انواع روش‌های تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری سیال هوا برای طراحی تهویه معادن تعریف شده است.



شکل ۳-۳۵ عملکرد دستور Build-Run

۳-۵-۸- دستور Output

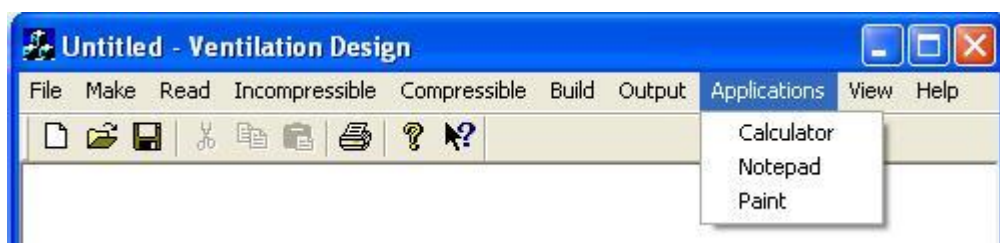
عملکرد دستور Output در شکل ۳-۳۶ نشان داده شده است. از این دستور برای نمایش انواع فایل‌های خروجی در طراحی تهویه معادن استفاده می‌شود.



شکل ۳-۳۶ عملکرد دستور Output

۳-۵-۹- دستور Applications

عملکرد دستور Applications در شکل ۳-۳۷ نشان داده شده است. از این دستور برای اجرای چند برنامه کاربردی همچون ماشین حساب، Notepad و نقاشی استفاده می‌شود.



شکل ۳-۳۷ عملکرد دستور Applications

۳-۵-۱۰- دستور View

از این دستور برای مدیریت نوار ابزار در برنامه رایانه‌ای استفاده می‌شود.

۳-۵-۱۱- دستور Help

از این دستور برای توضیح برخی از دستورات تعریف شده در برنامه رایانه‌ای استفاده می‌شود.

۳-۶- روش‌های اعتبار سنجی درونی و بیرونی

در این رساله برای اعتبارسنجی درونی و بیرونی روش‌های قبلی و جدید مطرح شده در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در خصوص طراحی تهویه معادن از دو مدل استفاده شده است. در مدل اول از نتایج مدل‌های حل شده تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری از منابع (McPherson, 1993) و (مدنی، ۱۳۸۲) استفاده کرده و نتایج این منابع با نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design مقایسه می‌شود. در مدل دوم، مطالعات موردی مختلفی از معادن شرکت زغالسنگ البرز شرقی شاهرود در مدل تراکم‌ناپذیری انجام شده و نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design با نتایج نرم‌افزار Ventsim مقایسه می‌شود.

۳-۷- جمع‌بندی

در این فصل برای طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری به منظور سرعت بخشیدن به حل معادله اتکینسون برای دستیابی به جواب نهایی، روش‌های جدیدی تحت عنوان دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس، روش‌های اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس و نیوتن-رافسون بدون مشتق ارائه شد. همچنین برای طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌پذیری برای تحلیل هوای مرطوب لازم شد تا برای سرعت بخشیدن به حل معادلات ترمودینامیکی، روش‌های جدیدی تحت عنوان روش دلتا، روش K و روش K-W مطرح شد. همچنین برای تسریع انجام محاسبات ریاضی و کاهش خطای محاسبات انسانی، برنامه رایانه‌ای تحت عنوان Ventilation Design در این فصل ارائه شد.

فصل چهارم

نتایج و یافته‌های مطالعات موردی

۴-۱- مقدمه

در این رساله برای اعتبارسنجی روش‌های مطرح شده در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در خصوص طراحی تهویه معادن از دو مدل استفاده شده است. در مدل اول که مربوط به اعتبارسنجی درونی است از نتایج مدل‌های حل شده تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری از منابع (McPherson, 1993) و (مدنی، ۱۳۸۲) استفاده کرده و نتایج این منابع با نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design مقایسه می‌شود. در مدل دوم که مربوط به اعتبارسنجی بیرونی است از مطالعات موردی مختلفی از معادن شرکت زغالسنگ البرز شرقی شاهرود انجام شده و نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design با نتایج نرم‌افزار Ventsim کنترل می‌شود.

۴-۲- اعتبارسنجی درونی

برای اعتبار سنجی درونی از روش‌های مطرح شده در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال‌های حل شده در منابع (McPherson, 1993) و (مدنی، ۱۳۸۲) استفاده شده است.

۴-۲-۱- اعتبارسنجی گرما در حفریات معدنی

روابط استفاده شده در دستور Strata Heat از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در خصوص تحلیل گرما از حفریات معدنی با سطوح مختلف کاملاً مطابق پیوست‌های ۱۶ تا ۲۱ است. برای اعتبارسنجی برنامه مذکور از مطالعه موردی انجام شده از منبع (McPherson, 1993) که طبق پیوست ۲۲ است استفاده می‌شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۱ ارائه شده است. همچنین مقدار گرمای حاصل شده (q) در پیوست ۲۲ برابر ۲۴ وات بر

متر مربع است که در برنامه مذکور این مقدار گرما (q) برابر ۲۳/۸۷۶۶۱۲ وات بر متر مربع محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف دقت تعداد ارقام اعشار است که برنامه مذکور در این رساله از دقت بیشتری در محاسبه تعداد ارقام اعشار استفاده می کند.

جدول ۱-۴ نتایج برنامه رایانه ای Ventilation Design برای گرمای حفريات معدنی

F=4.653825	Re=670000.000000	Nu=2432.552144
hc=21.742497 w/m ² c	href=1.597002 w/m ² c	h=23.339499 w/m ² c
B=9.905591	G=0.596091	q=23.876612 w/m ²

۴-۲-۲- اعتبار سنجی گرما در تجهیزات الکتریکی

برای اعتبار سنجی گرما از تجهیزات الکتریکی در برنامه رایانه ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (McPherson, 1993) که طبق پیوست ۲۳ است استفاده می شود. نتیجه حاصل از شده از برنامه رایانه ای Ventilation Design در جدول ۲-۴ ارائه شده است. همچنین مقدار گرمای حاصل شده در پیوست ۲۳ برابر ۶۲۷/۵ کیلو وات است که در برنامه مذکور این مقدار گرما (q) برابر ۶۲۷/۵۹۳۰۵۶ کیلو وات محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف در دقت تعداد ارقام اعشار است.

جدول ۲-۴ نتایج برنامه رایانه ای Ventilation Design برای گرمای تجهیزات الکتریکی

q=627.593056 (kw)	Total Heat=627.593056 kw
-------------------	--------------------------

۴-۲-۳- اعتبار سنجی گرما در تجهیزات دیزلی

برای اعتبار سنجی گرما از تجهیزات دیزلی در برنامه رایانه ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (McPherson, 1993) که طبق پیوست ۲۴ است استفاده می شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه ای Ventilation Design در جدول ۳-۴ ارائه شده است. همچنین مقدار گرمای حاصل شده در پیوست ۲۴ برابر ۲۳۸ کیلو وات است که در برنامه مذکور این مقدار گرما (q) برابر ۲۳۷/۷۷۹۷۴۱ کیلو وات محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف در دقت

تعداد ارقام اعشار است.

جدول ۳-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرمای تجهیزات دیزلی

$q=237.779741 \text{ kw}$	Total Heat=237.779741 kw
---------------------------	--------------------------

۴-۲-۴- اعتبارسنجی گرما در ایستگاه منبع آب

برای اعتبارسنجی گرما از ایستگاه منبع آب در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (McPherson, 1993) که طبق پیوست ۲۵ است استفاده می‌شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۴ ارائه شده است. همچنین مقدار گرمای حاصل شده در پیوست ۲۵ برابر ۲۴۲۳ کیلو وات است که در برنامه مذکور این مقدار گرما (q) برابر ۲۴۲۳/۰۳۲۳۴۷ کیلو وات محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف در دقت تعداد ارقام اعشار است.

جدول ۴-۴ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرما در ایستگاه منبع آب

$q=2423.032347 \text{ kw}$	Total Heat=2423.032347 kw
----------------------------	---------------------------

۴-۲-۵- اعتبارسنجی گرما از آب درون مجاری باز

برای اعتبارسنجی گرما از آب درون مجاری باز در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (McPherson, 1993) که طبق پیوست ۲۶ است استفاده می‌شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۵-۴ ارائه شده است. همچنین مقدار گرمای حاصل شده (q) در پیوست ۲۶ برابر ۲/۵۳۹ کیلو وات است که در برنامه مذکور این مقدار گرما (q) برابر ۲/۵۸۶۷۲۳ کیلو وات محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف در دقت تعداد ارقام اعشار است.

جدول ۴-۵ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرمای آب درون مجاری باز

Re=957143.587385	Nu=2127.382160	hc=16.402103 w/m ² c
qsen=32.804207 w/m ²	ql=484.540461 w/m ²	q=517.344668 w/m ²
q=2.586723 kw	Total Heat=2.586723 kw	

۴-۲-۶- اعتبارسنجی گرما از اکسایش مواد معدنی

برای اعتبارسنجی گرما از اکسایش مواد معدنی در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (McPherson, 1993) که طبق پیوست ۲۷ است استفاده می‌شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۶ ارائه شده است. همچنین مقدار گرمای حاصل شده در پیوست ۲۷ برابر ۳۳۰ کیلو وات است که در برنامه مذکور این مقدار گرما (q) برابر ۳۲۹/۵۵۱۲۵۷ کیلو وات محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف در دقت تعداد ارقام اعشار است.

جدول ۴-۶ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرما از اکسایش مواد معدنی

q=329.551257 kw	Total Heat=329.551257 kw
-----------------	--------------------------

۴-۲-۷- اعتبارسنجی گرما از انفجار مواد منفجره

برای اعتبارسنجی گرما از انفجار مواد منفجره در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (McPherson, 1993) که طبق پیوست ۲۸ است استفاده می‌شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۷ ارائه شده است. همچنین مقدار گرمای حاصل شده در پیوست ۲۸ برابر ۳۲۹ کیلو وات است که در برنامه مذکور این مقدار گرما (q) برابر ۳۲۸/۸۸۸۸۸۹ کیلو وات محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف در دقت تعداد ارقام اعشار است.

جدول ۴-۷ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرما از انفجار مواد منفجره

q=328.888889 kw	Total Heat=328.888889 kw
-----------------	--------------------------

۴-۲-۸- اعتبارسنجی گرما از حمل و نقل سنگ‌های خرد شده

برای اعتبارسنجی گرما از حمل و نقل سنگ‌های خرد شده در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (McPherson, 1993) که طبق پیوست ۲۹ است استفاده می‌شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۸ ارائه شده است. همچنین مقدار گرمای حاصل شده در پیوست ۲۹ برابر ۶۴۷ کیلو وات است که در برنامه مذکور این مقدار گرما (q) برابر ۶۴۷/۴۰۶۹۴۴ کیلو وات محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف در دقت تعداد ارقام اعشار است.

جدول ۴-۸ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرما از حمل و نقل سنگ‌های خرد شده

q=647.406944 kw	Total Heat=647.406944 kw
-----------------	--------------------------

۴-۲-۹- اعتبارسنجی گرمای حاصل از پرسنل

برای اعتبارسنجی گرمای حاصل از پرسنل در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (مدنی، ۱۳۸۲) که طبق پیوست ۳۰ است استفاده می‌شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۹ ارائه شده است. همچنین مقدار گرمای حاصل شده در پیوست ۳۰ برابر ۱۶۵ کیلو وات است که در برنامه مذکور هم این مقدار گرما (q) برابر ۱۶۵ کیلو وات محاسبه شده است.

جدول ۴-۹ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای گرمای حاصل از پرسنل

q=165.000000 kw	Total Heat=165.000000 kw
-----------------	--------------------------

۴-۲-۱۰- اعتبارسنجی تحلیل مدل هوای خشک

برای اعتبارسنجی تحلیل مدل هوای خشک در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (مدنی، ۱۳۸۲) که طبق پیوست ۳۱ است استفاده می‌شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۱۰ ارائه شده است. همچنین مقدار فشار نهایی

خروجی حاصل شده (P_2) در پیوست ۳۱ برابر ۹۶/۱۴۷ کیلو پاسکال است که در برنامه مذکور این مقدار فشار نهایی (P_2) برابر ۹۶/۱۴۵ کیلو پاسکال محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف در جدول ۴-۱۱ مطرح شده است.

جدول ۴-۱۰ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای تحلیل مدل هوای خشک

$v_2=10.723655 \text{ m/s}$	$t_2=14.967664 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2=96145.087848 \text{ Pa}$
$w_2=0.000000 \text{ kg/kg}$	$Rh_2=0.000000$	$rd_2=1.162558 \text{ kg/m}^3$
$M=352.492175 \text{ kg/s}$	$cp=1005 \text{ J/kgK}$	

جدول ۴-۱۱ تعریف متغیرهای R و C_p در منابع مختلف

ردیف	شرح	واحد	Ventilation Design	مدنی
۱	C_p	$\text{J/kg}^\circ\text{K}$	۱۰۰۵	۱۰۰۴/۵
۲	R	$\text{J/kg}^\circ\text{K}$	۲۸۷/۰۴	۲۸۷

۴-۲-۱۱- اعتبارسنجی روش‌های قبلی تراکم‌ناپذیری

برای اعتبارسنجی روش‌های قبلی از طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری همچون انواع روش‌های هاردی کراس و نیوتن-رافسون در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (McPherson, 1993) که طبق پیوست ۳۲ است استفاده می‌شود. نتایج حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۱۲ ارائه شده که با نتایج ارائه شده در پیوست ۳۲ کاملاً یکسان هستند.

۴-۲-۱۲- جمع‌بندی اعتبارسنجی درونی

اعتبارسنجی درونی از انواع روش‌های قبلی از طراحی تهویه معادن در مدل‌های تراکم‌پذیری و تراکم‌ناپذیری از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در بخش‌های ۴-۲-۱ تا ۴-۲-۱۱ ارائه شد که نتایج نهایی مدل تراکم‌پذیری طبق جدول ۴-۱۳ و تراکم‌ناپذیری طبق جدول ۴-۱۲ بیانگر این مطلب هستند که نتایج حاصل شده از کدنویسی روش‌های قبلی در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design با مقادیر ارائه شده در پیوست‌های ۲۲ تا ۳۲ مطابقت دارند. بنابراین نتایج حاصل شده از کدنویسی

برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از اطمینان کامل برخوردار هستند.

جدول ۴-۱۲ نتایج اعتبارسنجی درونی از روش‌های قبلی تراکم‌ناپذیری

ردیف	شرح	Q_{AB}	Q_{BD}	Q_{BC}	Q_{AC}	Q_{CD}
۱	پیوست شماره ۳۱	۶۸/۸۳	۲۸/۸۳	۴۰	۳۱/۱۷	۷۱/۱۷
۲	هاردی کراس	۶۸/۸۳۰۵۱۰	۲۸/۸۳۵۱۸۰	۳۹/۹۹۵۳۲۰	۳۱/۱۶۹۴۹۰	۷۱/۱۶۴۸۲۰
۳	هاردی کراس اصلاح شده ونگ	۶۸/۸۳۰۵۱۰	۲۸/۸۳۵۱۸۰	۳۹/۹۹۵۳۲۰	۳۱/۱۶۹۴۹۰	۷۱/۱۶۴۸۲۰
۴	مدل تلفیقی هاردی کراس	۶۸/۸۳۰۵۱۰	۲۸/۸۳۵۱۸۰	۳۹/۹۹۵۳۲۰	۳۱/۱۶۹۴۹۰	۷۱/۱۶۴۸۲۰
۵	نیوتن- رافسون مدل اصلاح شده ونگ	۶۸/۸۳۰۵۱۰	۲۸/۸۳۵۱۸۰	۳۹/۹۹۵۳۲۰	۳۱/۱۶۹۴۹۰	۷۱/۱۶۴۸۲۰
۶	نیوتن- رافسون با جهت‌های متغیر	۶۸/۸۳۰۵۱۰	۲۸/۸۳۵۱۸۰	۳۹/۹۹۵۳۲۰	۳۱/۱۶۹۴۹۰	۷۱/۱۶۴۸۲۰
۷	مقدار خطا (m3/s)	-۰/۰۰۰۵۱۰	-۰/۰۰۵۱۸۰	۰/۰۰۴۶۸۰	۰/۰۰۰۵۱۰	۰/۰۰۵۱۸۰

جدول ۴-۱۳ نتایج اعتبارسنجی درونی از مدل تراکم‌پذیری

ردیف	شرح	شماره پیوست	مقادیر پیوست	Ventilation Design	مقدار خطا	واحد
۱	تحلیل گرما از حفريات معدنی	۲۲	۲۴	۲۳/۸۷۶۶۱۲	۰/۱۲۳	w/m ²
۲	تحلیل گرما از تجهیزات الکتریکی	۲۳	۶۲۷/۵	۶۲۷/۵۹۳۰۵۶	-۰/۰۹۳	kw
۳	تحلیل گرما از تجهیزات دیزلی	۲۴	۲۳۸	۲۳۷/۷۷۹۷۴۱	۰/۲۲۰	kw
۴	تحلیل گرما از ایستگاه منبع آب	۲۵	۲۴۲۳	۲۴۲۳/۰۳۲۳۴۷	-۰/۳۲۳	kw
۵	تحلیل گرما از آب درون مجاری باز	۲۶	۲/۵۳۹	۲/۵۸۶۷۲۳	-۰/۰۴۸	kw
۶	تحلیل گرما از اکسایش مواد معدنی	۲۷	۳۳۰	۳۲۹/۵۵۱۲۵۷	۰/۴۴۹	kw
۷	تحلیل گرما از انفجار مواد منفجره	۲۸	۳۲۹	۳۲۸/۸۸۸۸۸۹	۰/۱۱۱	kw
۸	تحلیل گرما از حمل و نقل سنگ‌های خرد شده	۲۹	۶۴۷	۶۴۷/۴۰۶۹۴۴	-۰/۴۰۷	kw
۹	تحلیل گرمای حاصل از پرسنل	۳۰	۱۶۵	۱۶۵	۰/۰۰	kw
۱۰	تحلیل مدل هوای خشک	۳۱	۹۶/۱۴۷	۹۶/۱۴۵	۰/۰۰۲	kPa

۴-۳- اعتبارسنجی بیرونی

برای اعتبار سنجی بیرونی از روش‌های جدید طراحی تهویه معادن ارائه شده در برنامه

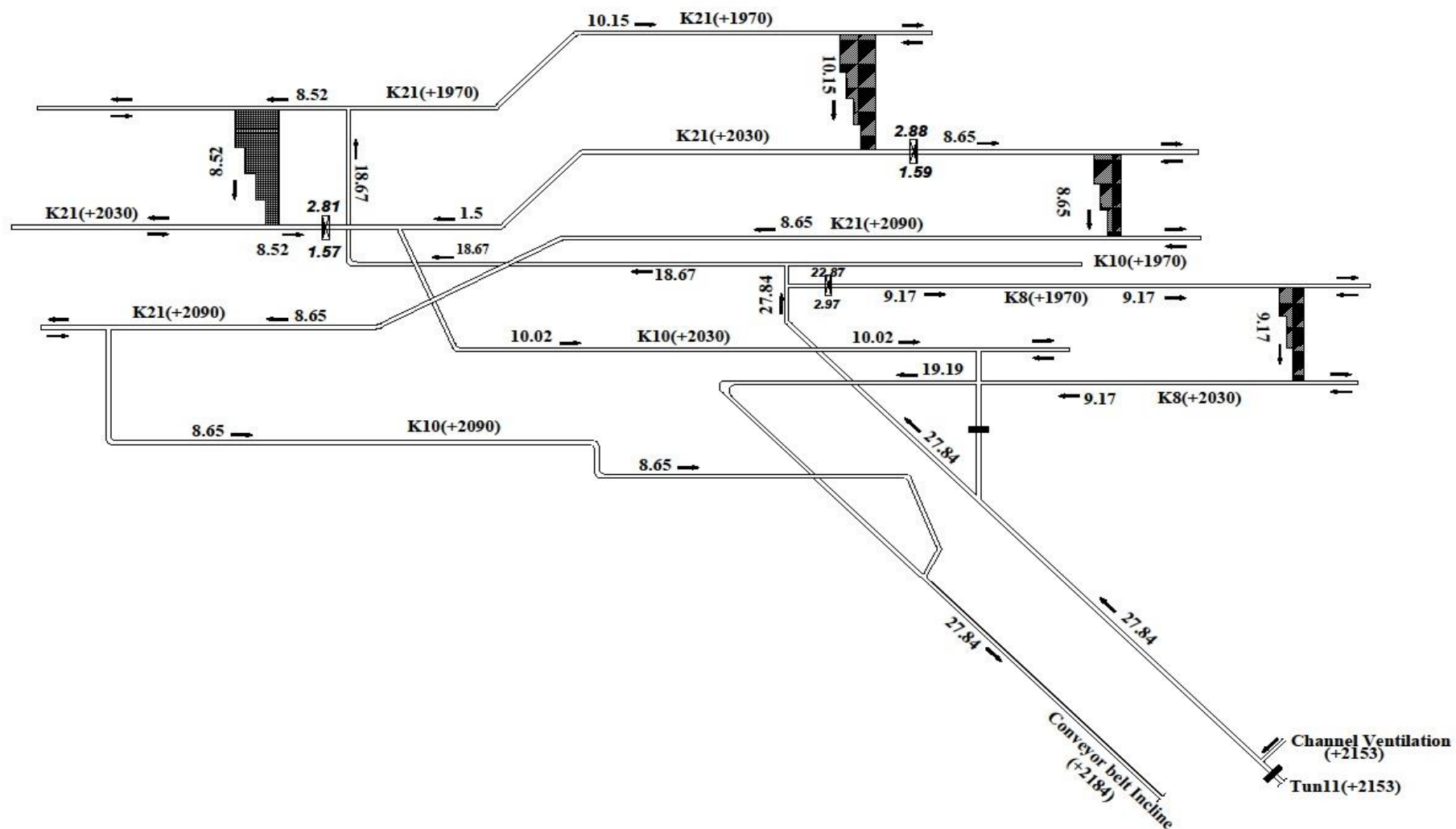
رایانه‌ای Ventilation Design از مطالعات موردی معادن شرکت زغالسنگ البرز شرقی شاهرود و مثال‌های حل شده از منابع (McPherson, 1993) و (مدنی، ۱۳۸۲) استفاده شده است.

۴-۳-۱- معدن رزمجا غربی

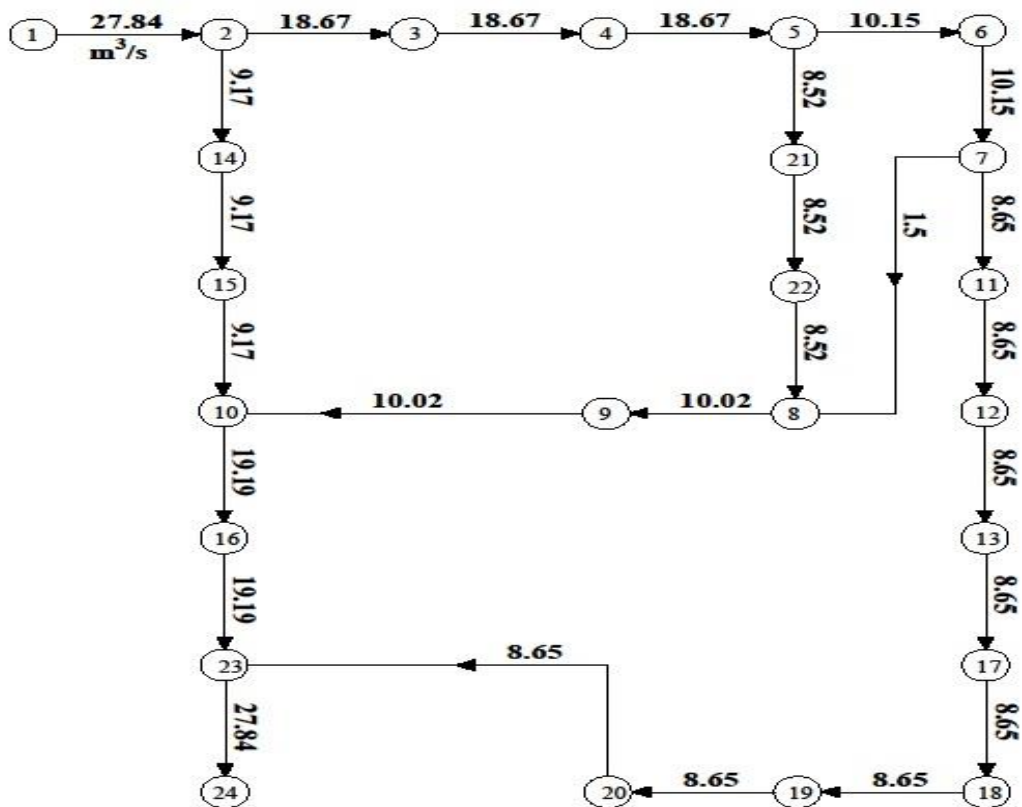
معدن رزمجا غربی در استان سمنان، شهرستان دامغان تحت حوزه شرکت زغالسنگ البرز شرقی شاهرود واقع شده است. این معدن تقریباً در فاصله ۶۰ کیلومتری از شهرستان دامغان واقع شده است. طرح تهویه این معدن در شکل ۴-۱ ارائه شده است. این طرح توسط دفتر فنی شرکت در سال ۱۳۸۴ طراحی شده است. در طرح تهویه، این معدن توسط دو اکلون وینچ و نوار بازگشایی شده و یک بادبزن با فشار استاتیکی ۱۶۳/۷۷ میلیمتر آب با شدت جریان حجمی ۲۷/۸۴ متر مکعب بر ثانیه در کانال تهویه آن در نظر گرفته شده است. بادبزن اصلی به صورت دهشی هوای تمیز را از کانال تهویه به درون اکلون وینچ دمیده و سپس با عبور از حفاریات مختلف به پایین‌ترین افق معدن هدایت و نهایتاً هوای کثیف بعد از عبور از چهار کارگاه استخراج از اکلون نوار خارج می‌شود.

هدف از این مطالعه در این رساله، بررسی عملکرد روش‌های مختلف هاردی کراس و نیوتن-رافسون در طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری در یک مثال واقعی است. بر این اساس لازم است در ابتدا شبکه تهویه معدن مذکور ساده شود که نتایج آن در شکل ۴-۲ و جدول ۴-۱۴ نشان داده شده سپس شدت جریان‌های حجمی فرضی همراه با حلقه‌های فرضی در نظر گرفته شود که نتایج آن در شکل ۴-۳ و عملکرد روش‌های مختلف توسط برنامه Ventilation Design مورد بررسی قرار گرفته است. اگر دقت انجام محاسبات ریاضی برابر 10^{-9} فرض شود در این صورت نتایج نهایی این برنامه رایانه‌ای مطابق جدول ۴-۱۵ خواهد شد. با توجه به جدول ۴-۱۵ مشاهده می‌شود که اکثر روش‌های اصلاح شده از نظر زمان، عملکرد تقریباً یکسانی دارند زیرا این مطالعه موردی از پیچیدگی لازم جهت شفاف‌سازی عملکرد واقعی روش‌های مذکور برخوردار نبوده است. همچنین مشخصات سخت‌افزاری رایانه مورد استفاده در این مطالعات به شرح ذیل است:

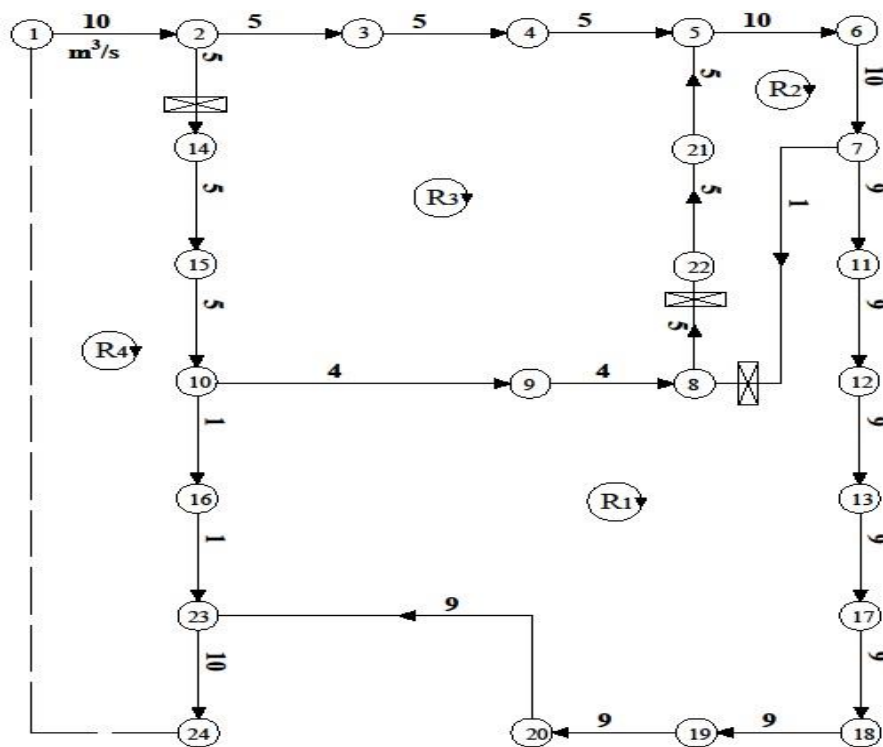
Computer: Intel(R)- Celeron(R), CPU 2.4 GHZ, 248 MB of RAM



شکل ۴-۱ طرح شبکه تهویه معدن رزمجا غربی به همراه شدت جریان حجمی شاخه‌های آن (الهی، ۱۳۹۳ الف)



شکل ۴-۲ شدت جریان شاخه‌های شبکه تهویه معدن رزمجا غربی (الهی، ۱۳۹۳ الف)



شکل ۴-۳ شدت جریان حجمی و حلقه‌های فرضی شبکه تهویه معدن رزمجا غربی

جدول ۴-۱۴ مقاومت شاخه‌های شبکه تهویه معدن رزمجا غربی (کیلومورگ)

شاخه	مقاومت	شاخه	مقاومت	شاخه	مقاومت	شاخه	مقاومت
۱-۲	۰/۰۶۶۹	۱۱-۱۲	۰/۲۶۶۹	۲۳-۲۴	۰/۰۳۰۶	۱۰-۱۶	۰/۰۲۳۷
۲-۳	۰/۰۰۳۰	۱۲-۱۳	۰/۰۵۴۹	۷-۸	۶/۸۹۱۵	۱۶-۲۳	۰/۰۲۱۰
۳-۴	۰/۰۳۹۷	۱۳-۱۷	۰/۰۱۰۴	۲۲-۸	۰/۳۷۲۴	۱۵-۱۰	۰/۰۲۹۳
۴-۵	۰/۰۰۸۵	۱۷-۱۸	۰/۰۲۵۵	۲۱-۲۲	۰/۲۶۶۹	۱۴-۱۵	۰/۲۶۶۹
۵-۶	۰/۰۴۶۳	۱۸-۱۹	۰/۰۰۹۴	۵-۲۱	۰/۰۱۸۹	۲-۱۴	۰/۵۵۶۵
۶-۷	۰/۲۶۶۹	۱۹-۲۰	۰/۰۵۶۷	۸-۹	۰/۰۵۷۷	-	-
۷-۱۱	۰/۰۲۳۷	۲۰-۲۳	۰/۰۶۱۵	۹-۱۰	۰/۰۰۲۹	-	-

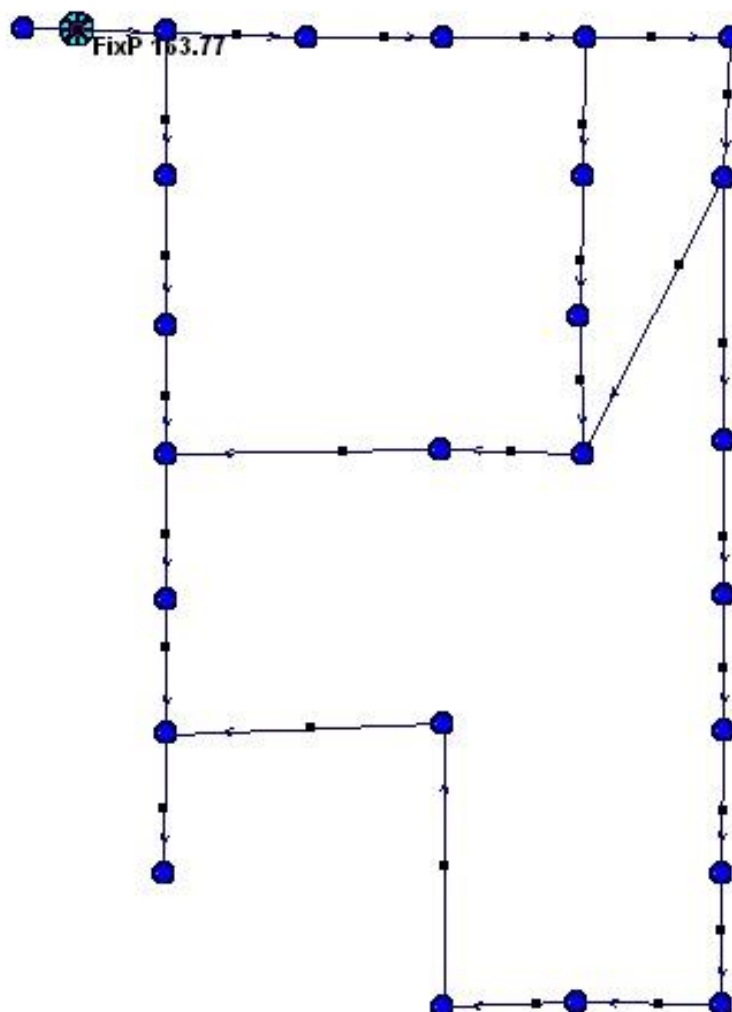
جدول ۴-۱۵ عملکرد روش‌های مختلف بر تهویه معدن رزمجا غربی توسط Ventilation Design

ردیف	روش	عملکرد	شدت جریان حجمی کانال تهویه (متر مکعب بر ثانیه)	تعداد تکرار	زمان (ثانیه)
۱	هاردی کراس	همگرا	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۱۰۷	۰
۲	هاردی کراس مدل ونگ	همگرا	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۱۰۷	۰
۳	مدل تلفیقی هاردی کراس	همگرا	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۵۵	۰
۴	دومین مدل تلفیقی هاردی کراس	همگرا	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۱۹	۰
۵	نیوتنی هاردی کراس اصلاح شده	همگرا	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۱۰۷	۰
۶	مرتب‌ه سوم نیوتنی هاردی کراس اصلاح شده	همگرا	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۶۰	۰
۷	مرتب‌ه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس اصلاح شده	همگرا	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۴۲	۰
۸	نیوتن-رافسون مدل ونگ	واگرا	-	بی‌نهایت	بی‌نهایت
۹	نیوتن-رافسون جهت‌های متغیر	همگرا	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۷	۰
۱۰	نیوتن-رافسون بدن مشتق	همگرا	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۷	۰

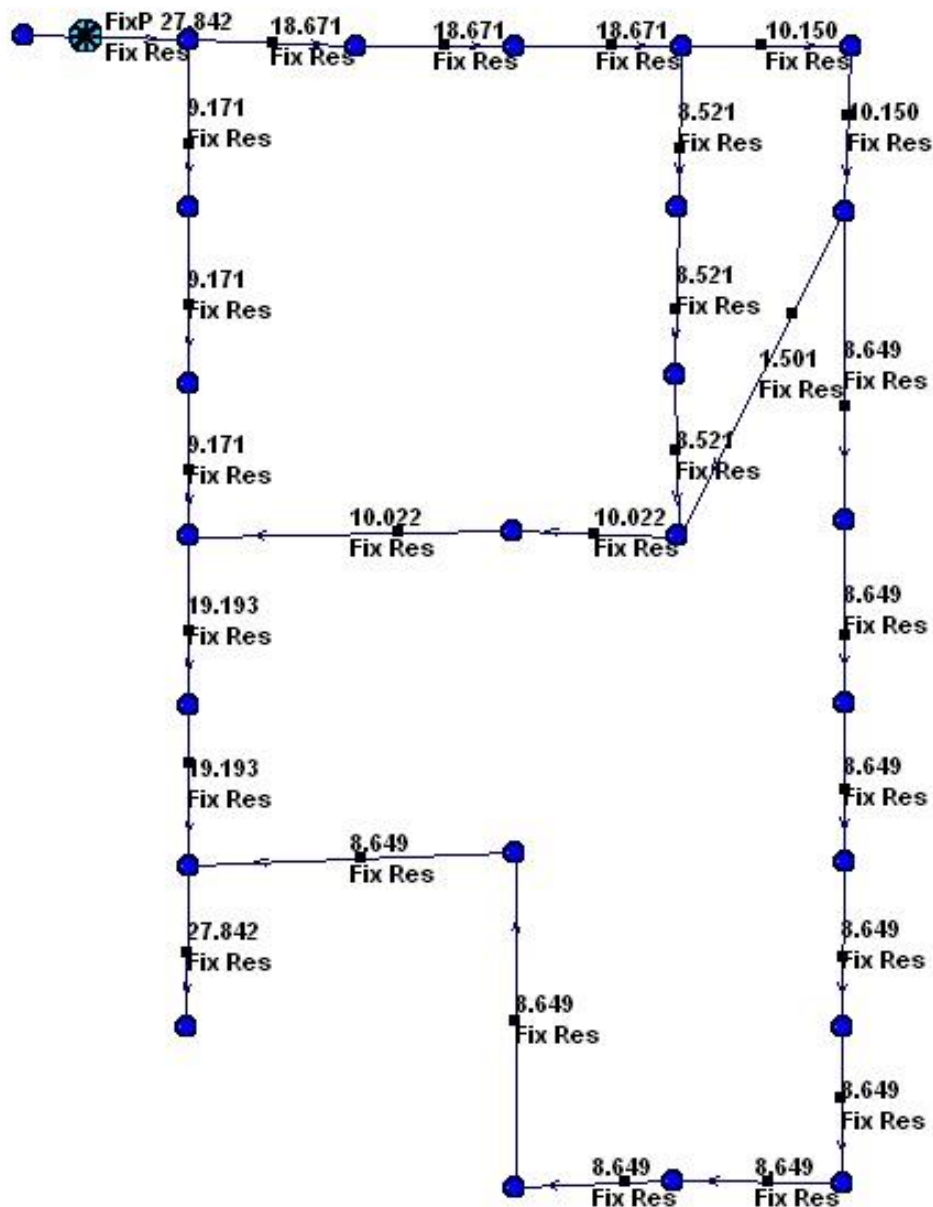
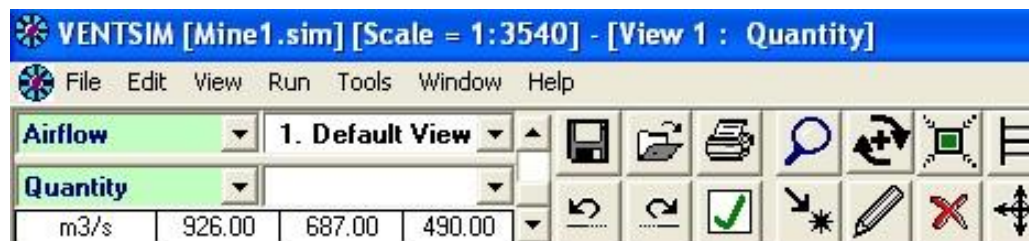
۴-۳-۲- اعتبار سنجی نتایج معدن رزمجا غربی

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در خصوص معدن رزمجا غربی از نرم‌افزار Ventsim استفاده شده است. نرم‌افزار Ventsim یکی از رایج‌ترین و معروف‌ترین نرم‌افزارهای طراحی تهویه معدن است. ابتدا کروکی معدن رزمجا غربی که در شکل ۴-۳ ارائه شده در نرم‌افزار Ventsim مطابق شکل ۴-۴ وارد شده سپس با استفاده از اطلاعات جدول ۴-۱۴ و اطلاعات بادبزن اصلی در کانال تهویه با فشار استاتیکی ۱۶۳/۷۷ میلیمتر آب منظور شده

سپس نتایج نرم‌افزار Ventsim مطابق شکل ۴-۵ خواهد شد. همچنین نتایج نهایی از دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس و نیوتن-رافسون بدون مشتق توسط برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۱۶ ارائه شده است. نتایج حاصل از این دو برنامه رایانه‌ای بیانگر این مطلب است که نتایج کاملاً یکسانی را با هم ارائه کرده‌اند.



شکل ۴-۴ طرح شبکه تهویه معدن رزمجا غربی در نرم‌افزار Ventsim (3.9.3a)



شکل ۴-۵ نتایج شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه) برای معدن رزمجا غربی توسط نرم افزار Ventsim (3.9.3a)

جدول ۴-۱۶ نتایج شدت جریان حجمی برای معدن رزمجا غربی

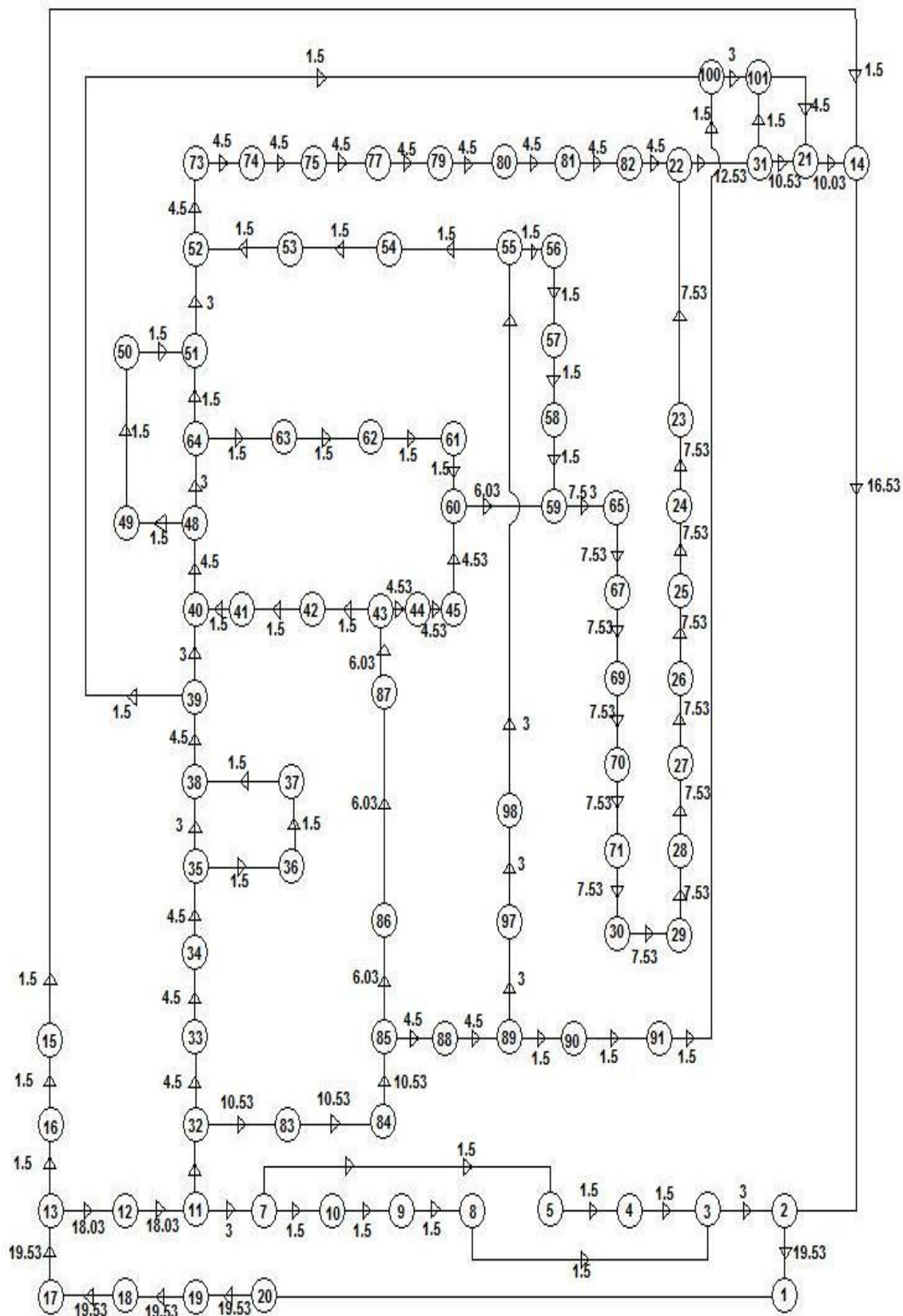
ردیف	شاخه	شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه)	
		Ventsim	Ventilation Design
۱	۱-۲	۲۷/۸۴۲	۲۷/۸۴۲۰۸۰
۲	۲-۳	۱۸/۶۷۱	۱۸/۶۷۰۷۴۴
۳	۳-۴	۱۸/۶۷۱	۱۸/۶۷۰۷۴۴
۴	۴-۵	۱۸/۶۷۱	۱۸/۶۷۰۷۴۴
۵	۵-۶	۱۰/۱۵۰	۱۰/۱۴۹۸۵۳
۶	۶-۷	۱۰/۱۵۰	۱۰/۱۴۹۸۵۳
۷	۷-۱۱	۸/۶۴۹	۸/۶۴۹۰۱۲
۸	۱۱-۱۲	۸/۶۴۹	۸/۶۴۹۰۱۲
۹	۱۲-۱۳	۸/۶۴۹	۸/۶۴۹۰۱۲
۱۰	۱۳-۱۷	۸/۶۴۹	۸/۶۴۹۰۱۲
۱۱	۱۷-۱۸	۸/۶۴۹	۸/۶۴۹۰۱۲
۱۲	۱۸-۱۹	۸/۶۴۹	۸/۶۴۹۰۱۲
۱۳	۱۹-۲۰	۸/۶۴۹	۸/۶۴۹۰۱۲
۱۴	۲۰-۲۳	۸/۶۴۹	۸/۶۴۹۰۱۲
۱۵	۲۳-۲۴	۲۷/۸۴۲	۲۷/۸۴۲۰۸۰
۱۶	۷-۸	۱/۵۰۱	۱/۵۰۰۸۴۱
۱۷	۲۲-۸	۸/۵۲۱	۸/۵۲۰۸۹۰
۱۸	۲۱-۲۲	۸/۵۲۱	۸/۵۲۰۸۹۰
۱۹	۵-۲۱	۸/۵۲۱	۸/۵۲۰۸۹۰
۲۰	۸-۹	۱۰/۰۲۲	۱۰/۰۲۱۷۳۲
۲۱	۹-۱۰	۱۰/۰۲۲	۱۰/۰۲۱۷۳۲
۲۲	۱۰-۱۶	۱۹/۱۹۳	۱۹/۱۹۳۰۶۸
۲۳	۱۶-۲۳	۱۹/۱۹۳	۱۹/۱۹۳۰۶۸
۲۴	۱۵-۱۰	۹/۱۷۱	۹/۱۷۱۳۳۶
۲۵	۱۴-۱۵	۹/۱۷۱	۹/۱۷۱۳۳۶
۲۶	۲-۱۴	۹/۱۷۱	۹/۱۷۱۳۳۶

۴-۳-۳- معدن بزرگ طزره (مدل اول)

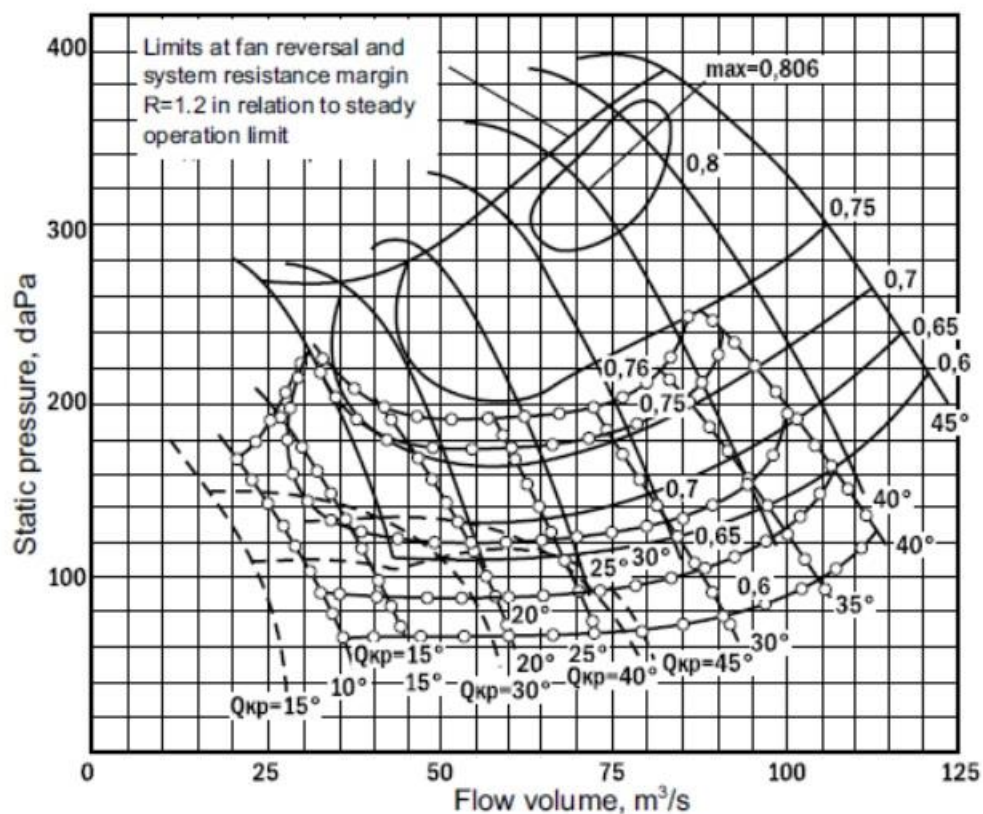
معدن بزرگ طزره در استان سمنان، شهرستان دامغان تحت حوزه شرکت زغالسنگ البرز شرقی شاهرود واقع شده است. این معدن تقریباً در فاصله ۶۰ کیلومتری از شهرستان دامغان واقع

شده است. کروکی ساده شده از طرح تهویه سال ۱۳۸۸ این معدن در شکل ۴-۶ ارائه شده است. این معدن توسط یک تونل یک دهانه، دو اکلون وینچ و یک اکلون نوار در افق‌های مختلف بازگشایی شده و یک بادبزن محوری با نام VOD 21 با مشخصات فنی ارائه شده در شکل ۴-۷ مربوط به دهه ۱۳۵۰ در کانال تهویه این معدن نصب و طراحی شده است. بادبزن اصلی به صورت دهشی هوای تمیز را از کانال تهویه به درون اکلون وینچ‌ها دمیده و سپس با عبور از حفاریات مختلف به پایین‌ترین افق معدن هدایت و نهایتاً هوای کثیف بعد از عبور از کارگاه‌های استخراج از اکلون نوار به سمت تونل یک دهانه خارج می‌شود. طبق شکل ۴-۶، حداقل هوای مورد نیاز این معدن برابر $19/53$ متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۴-۷ جهت تامین این هوای مورد نیاز لازم است پره بادبزن اصلی در وضعیت ۱۵ درجه قرار گیرد. بر این اساس فشار استاتیکی بادبزن اصلی طبق شکل ۴-۷ برابر ۲۸۰ میلیمتر آب خواهد شد.

هدف از این مطالعه در این رساله، بررسی عملکرد روش‌های مختلف هاردی کراس و نیوتن-رافسون در طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری در یک مثال واقعی است. مقاومت متوسط هر یک از شاخه‌های شبکه تهویه ۰/۱ کیلومورگ فرض می‌شود. شدت جریان‌های حجمی فرضی در شکل ۴-۸ و حلقه‌های فرضی در جدول ۴-۱۷ در نظر گرفته شده و عملکرد روش‌های مختلف توسط برنامه Ventilation Design مورد بررسی قرار گرفته است. اگر دقت انجام محاسبات ریاضی برابر 10^{-9} فرض شود در این صورت نتایج نهایی این برنامه رایانه‌ای در جدول ۴-۱۸ نشان داده شده است. با توجه به مدت زمان انجام محاسبات ریاضی در جدول ۴-۱۸ مشاهده می‌شود که سریع‌ترین روش طراحی تهویه در مدل تراکم‌ناپذیری مربوط به دو روش نیوتن-رافسون بدون مشتق و جهت‌دار است و در اولویت بعدی مربوط به دو مدل اول و دوم تلفیقی هاردی کراس است.



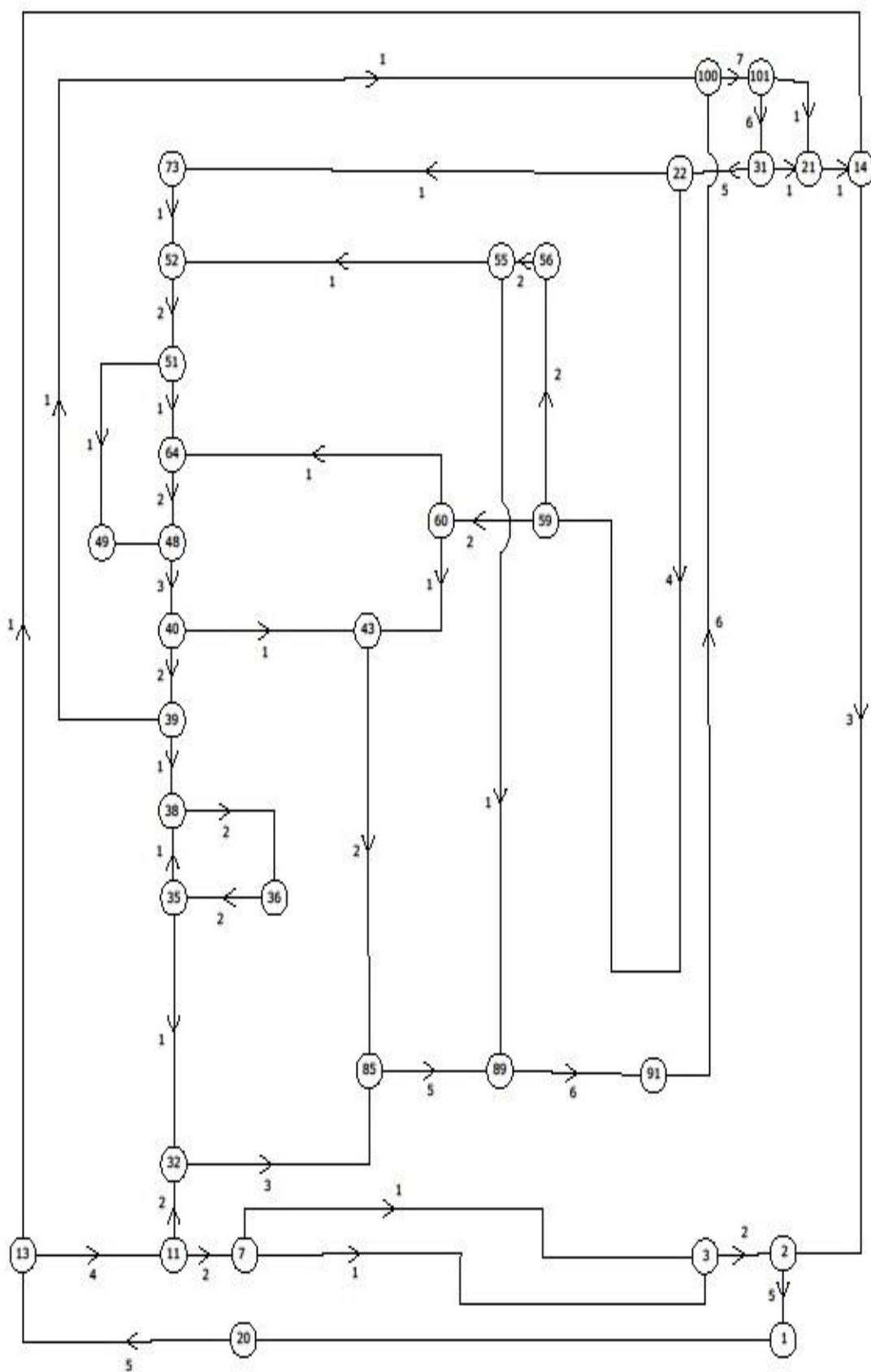
شکل ۴-۶ حداقل شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه) از شبکه تهویه معدن بزرگ طزره (الهی و همکاران، ۱۳۹۴)



شکل ۴-۷ کاتالوگ بادبزن VOD 21 (www.sibenergomash.com)

جدول ۴-۱۷ حلقه‌های فرضی در شبکه تهویه معدن بزرگ طزره

ردیف	نوع حلقه	شرح حلقه
۱	مستقل	۱-۲-۱۴-۱۳-۲۰-۱
۲	مفید	۶۴-۴۸-۴۰-۴۳-۶۰-۶۴
۳	مفید	۴۸-۶۴-۵۱-۴۹-۴۸
۴	مفید	۳۵-۳۶-۳۸-۳۵
۵	مفید	۷-۳-۵-۷
۶	مفید	۱۰۱-۳۱-۲۱-۱۰۱
۷	مفید	۵۶-۵۵-۵۲-۵۱-۶۴-۶۰-۵۹-۵۶
۸	مفید	۳۲-۳۵-۳۸-۳۹-۴۰-۴۳-۸۵-۳۲
۹	مفید	۵۲-۵۵-۵۶-۵۹-۲۲-۷۳-۵۲
۱۰	مفید	۳۹-۴۰-۴۸-۴۹-۵۱-۵۲-۷۳-۲۲-۳۱-۱۰۱-۱۰۰-۳۹
۱۱	مفید	۱۱-۳۲-۳۵-۳۸-۳۹-۱۰۰-۱۰۱-۲۱-۱۴-۱۳-۱۱
۱۲	مفید	۸۹-۸۵-۴۳-۶۰-۶۴-۵۱-۵۲-۵۵-۸۹
۱۳	مفید	۱۱-۷-۵-۳-۲-۱۴-۲۱-۳۱-۱۰۱-۱۰۰-۹۱-۸۹-۸۵-۳۲-۱۱
۱۴	مفید	۲۰-۱-۲-۳-۷-۱۱-۱۳-۲۰
۱۵	مفید	۶۰-۵۹-۲۲-۳۱-۲۱-۱۰۱-۱۰۰-۹۱-۸۹-۵۵-۵۲-۵۱-۶۴-۶۰



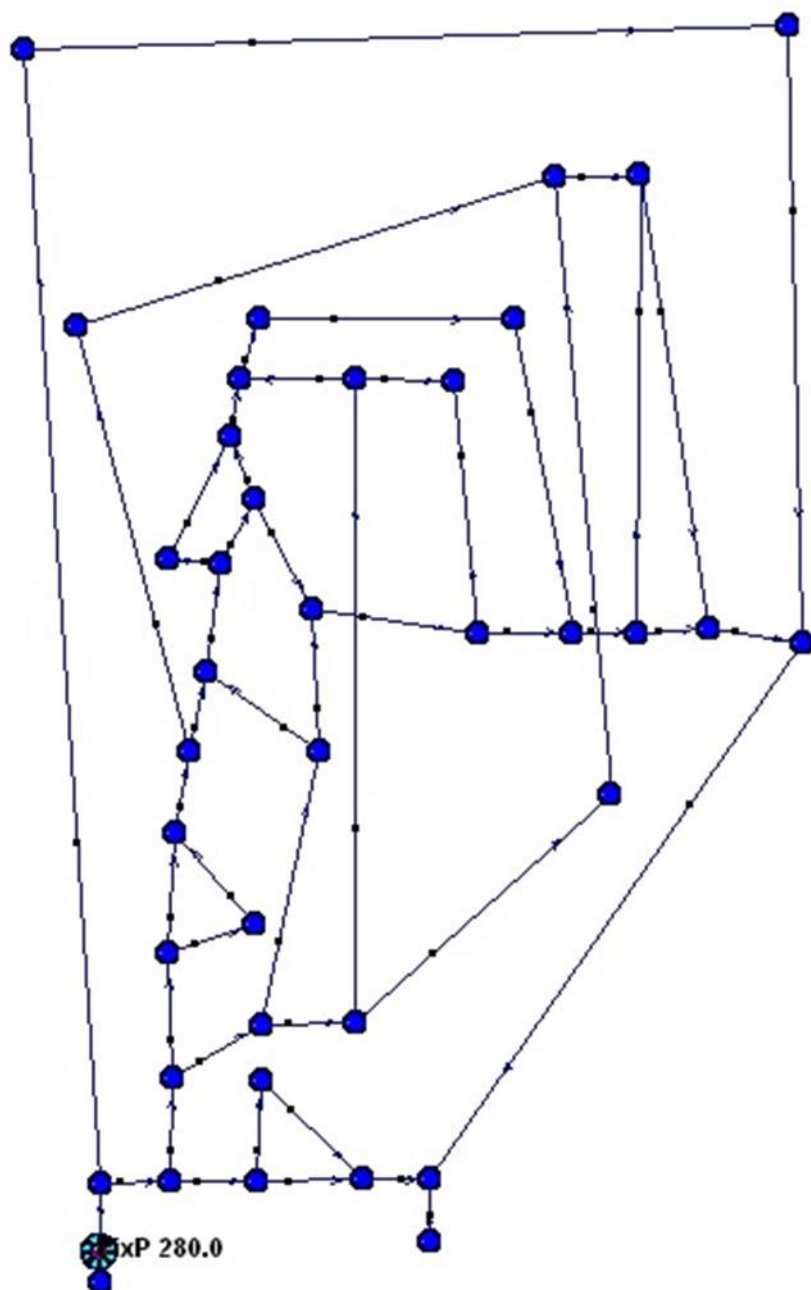
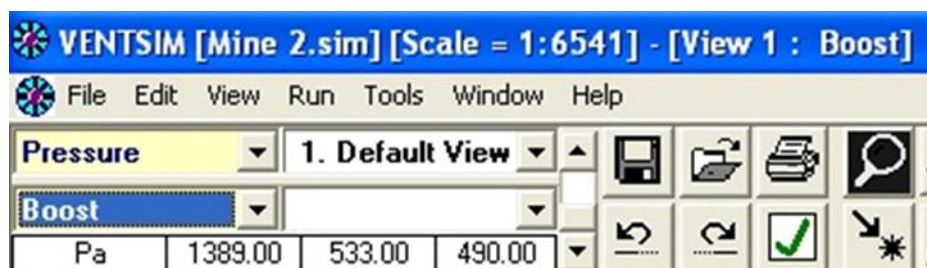
شکل ۴-۸ شدت جریان‌های حجمی فرضی (متر مکعب بر ثانیه) از شبکه تهویه معدن بزرگ طزره

جدول ۴-۱۸ عملکرد روش‌های مختلف بر تهویه معدن بزرگ طزره (مدل اول) توسط Ventilation Design

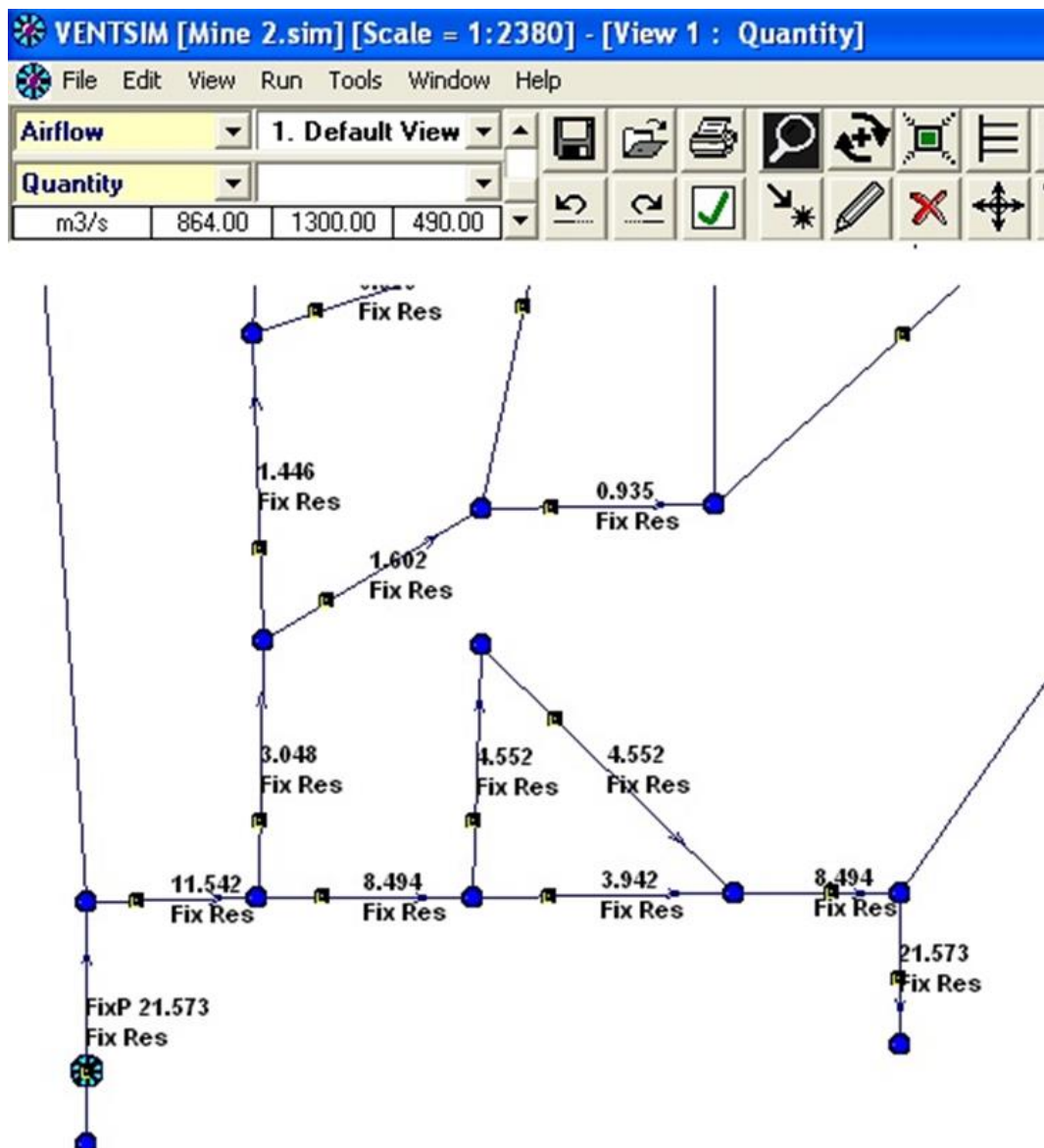
ردیف	روش	عملکرد	شدت جریان حجمی کانال تهویه (متر مکعب بر ثانیه)	تعداد تکرار	زمان (ثانیه)
۱	هاردی کراس	همگرا	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۲۶۹	۰/۰۳۱
۲	هاردی کراس مدل ونگ	همگرا	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۲۶۹	۰/۰۳۱
۳	مدل تلفیقی هاردی کراس	همگرا	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۱۴۳	۰/۰۱۶
۴	دومین مدل تلفیقی هاردی کراس	همگرا	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۱۲۱	۰/۰۱۶
۵	نیوتنی هاردی کراس اصلاح شده	همگرا	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۲۶۹	۰/۲۶۶
۶	مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس اصلاح شده	همگرا	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۱۴۶	۰/۲۱۸
۷	مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس اصلاح شده	همگرا	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۱۸۶	۰/۵۱۶
۸	نیوتن - رافسون مدل ونگ	واگرا	-	بی‌نهایت	بی‌نهایت
۹	نیوتن - رافسون جهت‌های متغیر	همگرا	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۹	۰/۰۰
۱۰	نیوتن - رافسون بدن مشتق	همگرا	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۱۰	۰/۰۰

۴-۳-۴- اعتبار سنجی نتایج معدن بزرگ طزره (مدل اول)

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در خصوص معدن بزرگ طزره (مدل اول) از نرم‌افزار Ventsim استفاده شده است. ابتدا کروکی معدن بزرگ طزره (مدل اول) که در شکل ۴-۸ ارائه شده در نرم‌افزار Ventsim مطابق شکل ۴-۹ وارد شده سپس با وارد کردن اطلاعات مربوط به مقاومت معدنی هر شاخه و اطلاعات بادبزن اصلی در کانال تهویه با فشار استاتیکی ۲۸۰ میلیمتر آب سبب طراحی تهویه این معدن توسط نرم‌افزار Ventsim شده که نتایج قسمتی از کروکی این معدن در شکل ۴-۱۰ ارائه شده است. همچنین نتایج نهایی قسمتی از کروکی این معدن با استفاده از دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس و نیوتن - رافسون بدون مشتق توسط برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۱۹ ارائه شده است. نتایج حاصل از این دو برنامه رایانه‌ای بیانگر این مطلب است که نتایج کاملاً یکسانی را با هم ارائه کرده‌اند.



شکل ۴-۹ طرح شبکه تهویه معدن بزرگ طزره (مدل اول) در نرم افزار Ventsim (3.9.3a)



شکل ۴-۱۰ نتایج قسمتی از شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه) برای معدن بزرگ طزره (مدل اول)
توسط نرم افزار Ventsim (3.9.3a)

جدول ۴-۱۹ نتایج قسمتی از شدت جریان حجمی برای معدن بزرگ طزره (مدل اول)

شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه)		شاخه	ردیف
Ventsim	Ventilation Design		
۲۱/۵۷۳	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۲۰-۱۳	۱
۱۱/۵۴۲	۱۱/۵۴۲۴۰۵	۱۳-۱۱	۲
۸/۴۹۴	۸/۴۹۴۳۷۹	۱۱-۷	۳
۳/۹۴۲	۳/۹۴۲۲۵۵	۷-۳	۴
۸/۴۹۴	۸/۴۹۴۳۷۹	۳-۲	۵
۲۱/۵۷۳	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۲-۱	۶

ادامه جدول ۴-۱۹ نتایج شدت جریان حجمی برای معدن بزرگ طزره (مدل اول)

ردیف	شاخه	شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه)	
		Ventsim	Ventilation Design
۷	۷-۵	۴/۵۵۲	۴/۵۵۲۱۲۴
۸	۵-۳	۴/۵۵۲	۴/۵۵۲۱۲۴
۹	۱۱-۳۲	۳/۰۴۸	۳/۰۴۸۰۲۶
۱۰	۳۲-۸۵	۱/۶۰۲	۱/۶۰۲۹۷۲
۱۱	۸۵-۸۹	۰/۹۳۵	۰/۹۳۵۰۲۹
۱۲	۳۲-۳۵	۱/۴۴۶	۱/۴۴۶۰۵۴

۴-۳-۵- معدن بزرگ طزره (مدل دوم)

جهت افزایش حساسیت عملکرد روش‌های مختلف هاردی کراس و نیوتن-رافسون در طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری لازم شد در شبکه تهویه معدن بزرگ طزره (مدل دوم) چندین بادبزن نصب تا نتایج دقیق‌تری حاصل شود. بر این اساس در شبکه تهویه معدن بزرگ که در شکل ۴-۸ ارائه شده، سه بادبزن فرضی با فشار تولیدی ۱۰۰ میلیمتر آب در شاخه‌های ۲۰-۱۳، ۳۹-۳۸ و ۵۹-۶۰ به صورت دهشی در نظر گرفته شده است. شدت جریان حجمی و حلقه‌های فرضی آن مطابق شکل ۴-۸ و جدول ۴-۱۷ است بر این اساس عملکرد روش‌های مختلف توسط برنامه Ventilation Design مورد بررسی قرار گرفته است. اگر دقت انجام محاسبات ریاضی برابر 10^{-9} فرض شود در این صورت نتایج نهایی این برنامه رایانه‌ای در جدول ۴-۲۰ ارائه شده است. با توجه به مدت زمان انجام محاسبات ریاضی در جدول ۴-۲۰ مشاهده می‌شود که سریع‌ترین روش طراحی تهویه در مدل تراکم‌ناپذیری مربوط به دو روش نیوتن-رافسون بدون مشتق و جهت‌دار است و در اولویت بعدی مربوط به دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس است.

جدول ۴-۲۰ عملکرد روش‌های مختلف بر تهویه معدن بزرگ (مدل دوم) توسط Ventilation Design

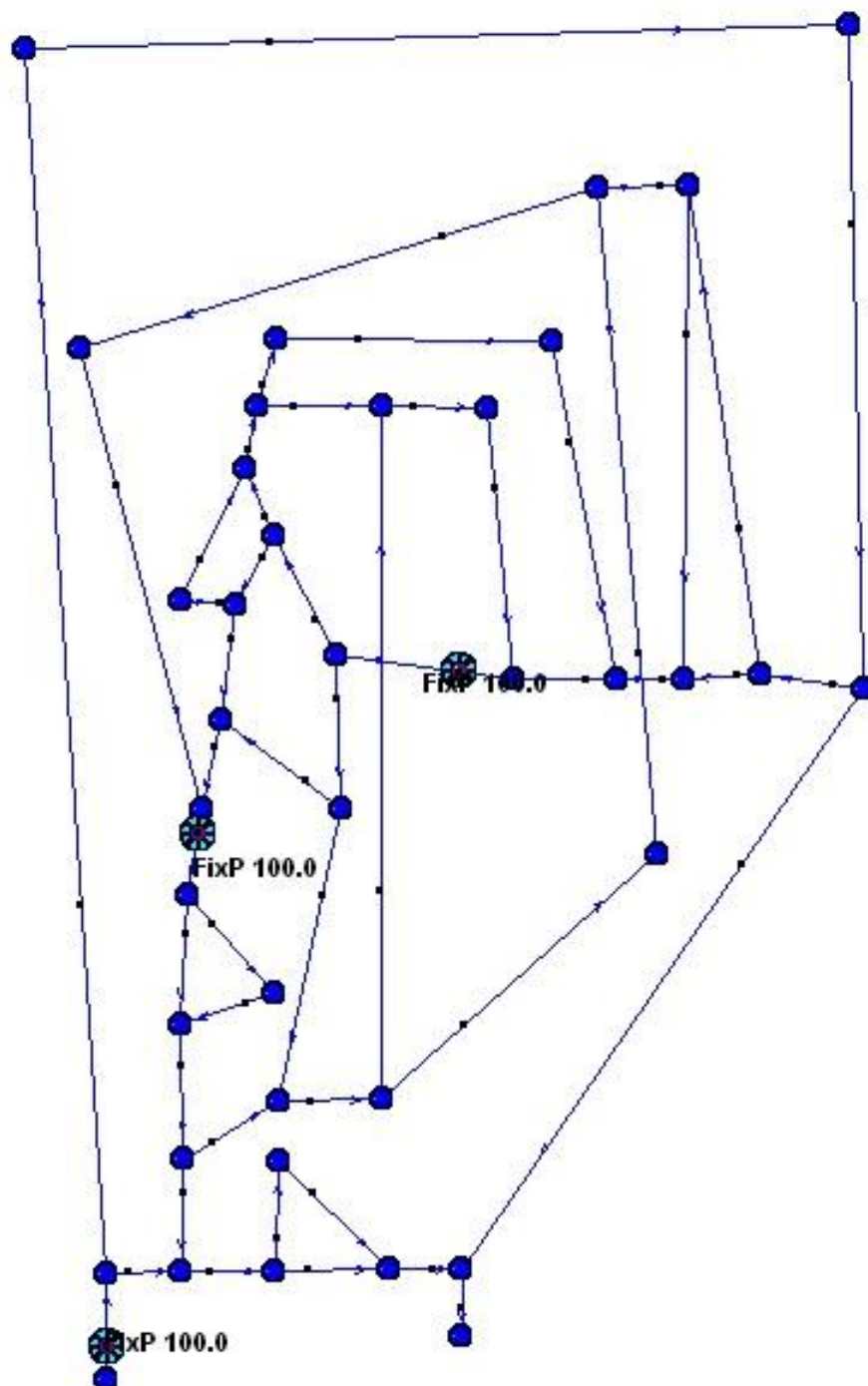
ردیف	روش	عملکرد	شدت جریان حجمی کانال تهویه	تعداد تکرار	زمان (ثانیه)
۱	هاردی کراس	واگرا	-	بی‌نهایت	بی‌نهایت
۲	هاردی کراس مدل ونگ	واگرا	-	بی‌نهایت	بی‌نهایت

ادامه جدول ۴-۲۰ عملکرد روش‌های مختلف بر تهویه معدن بزرگ (مدل دوم) توسط Ventilation Design

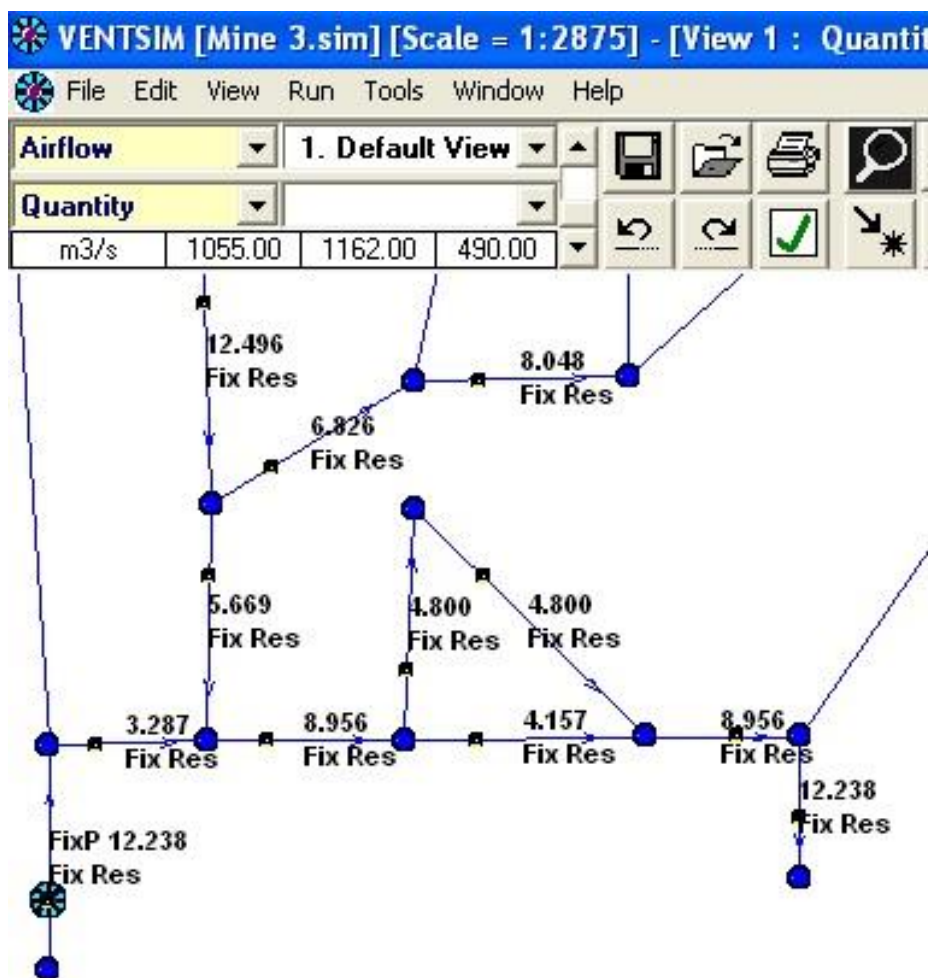
ردیف	روش	عملکرد	شدت جریان حجمی کانال تهویه	تعداد تکرار	زمان (ثانیه)
۳	مدل تلفیقی هاردی کراس	همگرا	۱۲/۲۳۸۱۲۳	۳۱۸	۰/۰۴۷
۴	دومین مدل تلفیقی هاردی کراس	همگرا	۱۲/۲۳۸۱۲۳	۱۰۰	۰/۰۱۶
۵	نیوتنی هاردی کراس اصلاح شده	واگرا	-	بی‌نهایت	بی‌نهایت
۶	مرتب‌به‌سوم نیوتنی هاردی کراس اصلاح شده	واگرا	-	بی‌نهایت	بی‌نهایت
۷	مرتب‌به‌شانزدهم نیوتنی هاردی کراس اصلاح شده	واگرا	-	بی‌نهایت	بی‌نهایت
۸	نیوتن - رافسون مدل ونگ	واگرا	-	بی‌نهایت	بی‌نهایت
۹	نیوتن - رافسون جهت‌های متغیر	همگرا	۱۲/۲۳۸۱۲۳	۸	۰/۰۰
۱۰	نیوتن - رافسون بدن مشتق	همگرا	۱۲/۲۳۸۱۲۳	۸	۰/۰۰

۴-۳-۶- اعتبار سنجی نتایج معدن بزرگ طوره (مدل دوم)

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در خصوص معدن بزرگ طوره (مدل دوم) از نرم‌افزار Ventsim استفاده شده است. ابتدا کروکی معدن بزرگ طوره (مدل دوم) که در شکل ۴-۸ ارائه شده در نرم‌افزار Ventsim مطابق شکل ۴-۱۱ وارد شده سپس با وارد کردن اطلاعات مربوط به مقاومت معدنی هر شاخه و اطلاعات سه بادبزن اصلی با فشار استاتیکی هر یک ۱۰۰ میلیمتر آب سبب طراحی تهویه این معدن توسط نرم‌افزار Ventsim شده که نتایج قسمتی از کروکی این معدن در شکل ۴-۱۲ ارائه شده است. همچنین نتایج نهایی قسمتی از کروکی این معدن با استفاده از دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس و نیوتن - رافسون بدون مشتق توسط برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۲۱ ارائه شده است. نتایج حاصل از این دو برنامه رایانه‌ای بیانگر این مطلب است که نتایج کاملاً یکسانی را با هم ارائه کرده‌اند.



شکل ۴-۱۱ طرح شبکه تهویه معدن بزرگ (مدل دوم) در نرم افزار Ventsim (3.9.3a)



شکل ۴-۱۲ شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه) قسمتی از شبکه تهویه معدن بزرگ (مدل دوم) در نرم افزار Ventsim (3.9.3a)

جدول ۴-۲۱ نتایج قسمتی از شدت جریان حجمی برای معدن بزرگ طزره (مدل دوم)

ردیف	شاخه	شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه)	
		Ventsim	Ventilation Design
۱	۲۰-۱۳	۱۲/۲۳۸	۱۲/۲۳۸۱۲۳
۲	۱۳-۱۱	۳/۲۸۷	۳/۲۸۶۹۵۱
۳	۱۱-۷	۸/۹۵۶	۸/۹۵۶۱۵۶
۴	۷-۳	۴/۱۵۷	۴/۱۵۶۵۶۷
۵	۳-۲	۸/۹۵۶	۸/۹۵۶۱۵۶
۶	۲-۱	۱۲/۲۳۸	۱۲/۲۳۸۱۲۳
۷	۷-۵	۴/۸۰۰	۴/۷۹۹۵۹۰
۸	۵-۳	۴/۸۰۰	۴/۷۹۹۵۹۰
۹	۱۱-۳۲	۵/۶۶۹	۵/۶۶۹۲۰۵
۱۰	۳۲-۸۵	۶/۳۲۶	۶/۳۲۶۳۳۶

ادامه جدول ۴-۲۱ نتایج شدت جریان حجمی برای معدن بزرگ طزره (مدل دوم)

شدت جریان حجمی (متر مکعب بر ثانیه)	شاخه	ردیف
Ventsim	Ventilation Design	
۸/۰۴۸	۸/۰۴۷۸۷۱	۸۵-۸۹
۱۲/۴۹۶	۱۲/۴۹۵۵۴۲	۳۲-۳۵

۴-۳-۷- اعتبارسنجی تحلیل مدل هوای مرطوب

برای اعتبارسنجی تحلیل مدل هوای مرطوب به دو روش دلتا و K در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design از مثال حل شده از منبع (مدنی، ۱۳۸۲) که طبق پیوست ۳۳ است استفاده می‌شود. نتیجه حاصل شده از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design در جدول ۴-۲۲ ارائه شده است. همچنین مقدار فشار نهایی خروجی حاصل شده (P_2) در پیوست ۳۳ برابر ۱۴۳/۲۰۵ کیلو پاسکال است که در برنامه مذکور این مقدار فشار نهایی (P_2) برابر ۱۴۳/۲۳۰ کیلو پاسکال محاسبه شده که از اختلاف کمی برخوردار است. علت این اختلاف در جدول ۴-۱۱ مطرح شده است.

جدول ۴-۲۲ نتایج برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای تحلیل مدل هوای مرطوب به دو روش

دلتا و K

$v_2=7.736087 \text{ m/s}$	$t_2=34.523545 \text{ } ^\circ\text{C}$	$p_2=143230.404582 \text{ Pa}$
$w_2=0.008000 \text{ kg/kg}$	$Rh_2=33.223101$	$rd_2=1.601225 \text{ kg/m}^3$
$M=111.484935 \text{ kg/s}$	$cp=1005 \text{ J/kgK}$	

۴-۳-۸- جمع‌بندی اعتبارسنجی بیرونی

اعتبارسنجی بیرونی از انواع روش‌های جدید براساس نتایج نهایی از مطالعات موردی در این فصل در خصوص طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌ناپذیری بیانگر این مطلب است که اولاً دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس به عنوان سریع‌ترین روش اصلاح شده هاردی کراس از نظر مدت زمان انجام محاسبات ریاضی است و ثانیاً روش نیوتن-رافسون بدون مشتق از نظر سهولت کاربرد و مدت زمان انجام محاسبات ریاضی به عنوان سریع‌ترین و بهترین روش در بین روش‌های نیوتن-رافسون و حتی در بین کلیه روش‌های مطرح شده است. از طرفی اعتبارسنجی انجام شده در خصوص

طراحی تهویه معادن در مدل تراکم‌پذیری بیانگر این مطلب است که نتایج حاصل شده از دو روش دلتا (Δ) و روش K از دقت و اطمینان لازم برخوردار بوده و همچنین روش‌های فوق سبب سهولت حل معادلات ترمودینامیکی شده‌اند. خلاصه‌ای از نتایج اعتبارسنجی بیرونی در جداول ۴-۲۳ و ۴-۲۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۲۳ نتایج اعتبارسنجی بیرونی از مدل تراکم‌ناپذیری

ردیف	شرح	معدن رزمجا غربی	معدن طزره (مدل اول)	معدن طزره (مدل دوم)	واحد
۱	Ventsim	۲۷/۸۴۲	۲۱/۵۷۳	۱۲/۲۳۸	M ³ /s
۲	Ventilation Design	۲۷/۸۴۲۰۸۰	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۱۲/۲۳۸۱۲۳	M ³ /s
۳		۲۷/۸۴۲۰۸۰	۲۱/۵۷۳۴۶۲	۱۲/۲۳۸۱۲۳	M ³ /s
۴	مقدار خطا		-۰/۰۰۰۰۸۰	-۰/۰۰۰۴۶۲	M ³ /s

جدول ۴-۲۴ نتایج اعتبارسنجی بیرونی از مدل تراکم‌پذیری

ردیف	شرح	شماره پیوست	مقادیر	واحد
۱	فشار هوای خروجی	۳۳	۱۴۳/۲۰۵	kPa
۲	Ventilation Design	-	۱۴۳/۲۳۰	kPa
۳		-	۱۴۳/۲۳۰	kPa
۴	مقدار خطا		-	kPa

۴-۴- مزایای برنامه رایانه‌ای Ventilation Design

۴-۴-۱- تعریف متغیرهای پویا

در این برنامه رایانه‌ای تعداد گره‌ها و شاخه‌های شبکه تهویه از نظر کدنویسی از نوع حافظه پویا یعنی از اشاره‌گرها (pointer) استفاده شده بر این اساس تعداد حداکثر متغیرها به حافظه سخت‌افزاری رایانه بستگی دارد. بنابراین تعریف حافظه پویا از مزایای این برنامه رایانه‌ای است.

۴-۴-۲- استفاده از ظرفیت گرمایی ویژه هوا در دو مدل ثابت و متغیر

طبق پیوست شماره ۱۲ ظرفیت گرمایی ویژه هوا متغیر است و تابع دمای محیط است. بر این

اساس، برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای تحلیل تهویه در مدل تراکم‌پذیری قادر است معادلات ترمودینامیکی وابسته به ظرفیت گرمایی ویژه هوا را در دو مدل ثابت (روش‌های دلتا و K) و متغیر (روش K-W) تحلیل کند که از مزایای این برنامه است. اما نرم‌افزار Ventsim این تحلیل را فقط در مدل ثابت انجام می‌دهد. جهت درک این مطلب به مثال مطرح شده در شکل ۴-۱۲ توجه شود. شکل ۴-۱۳ یکی از عملکرد دستورات گرما در نرم‌افزار Ventsim است که شامل سه داده ورودی یعنی دمای دماسنج مرطوب، دمای دماسنج خشک و فشار هوا به ترتیب برابر ۳/۵۱۲۳۴۴ درجه سانتی‌گراد، ۱۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۰۰ کیلو پاسکال و شش داده خروجی است که چگالی هوا (Air Density)، رطوبت نسبی (Humidity) و نسبت رطوبت (Moisture) وابسته به ظرفیت گرمایی ویژه هوا هستند. از نظر تحلیلی برای محاسبه سه خروجی فوق باید از روابط ترمودینامیکی استفاده شود. اگر در روابط ترمودینامیکی مطرح شده ذیل، مقدار ظرفیت گرمایی ویژه هوا برابر ۱۰۰۵ ژول بر کیلوگرم درجه کلوین فرض شود در این صورت نتایج این روابط ترمودینامیکی با نتایج نرم‌افزار Ventsim کاملاً یکسان خواهد شد که بیانگر این مطلب است که ظرفیت گرمایی ویژه هوا در نرم‌افزار Ventsim معادل مقدار ثابت ۱۰۰۵ ژول بر کیلوگرم درجه کلوین تعریف شده است.

- گرمای نهان تبخیر آب

$$L = (25025 - 2.386t_w) \times 10^3 = 2494119.54 \text{ J/kg}$$

- فشار بخار اشباع هوا

$$P_{vs} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27t_w}{237.3 + t_w}\right) = 785.508997 \text{ Pa}$$

- نسبت رطوبت اشباع

$$w_s = \frac{0.622 P_{vs}}{P - P_{vs}} = 0.00492454 \text{ kg/kg}$$

- نسبت رطوبت (Moisture)

$$w = \frac{L w_s - c_p (t_d - t_w)}{L + 1884 \times (t_d - t_w)} = \frac{L w_s - 1005 \times (t_d - t_w)}{L + 1884 \times (t_d - t_w)} = 0.00229905 \text{ kg/kg}$$

- فشار بخار هوا

$$P_v = \frac{P_w}{0.622 + w} = 368.268192 \text{ Pa}$$

- فشار بخار اشباع هوا در دمای خشک

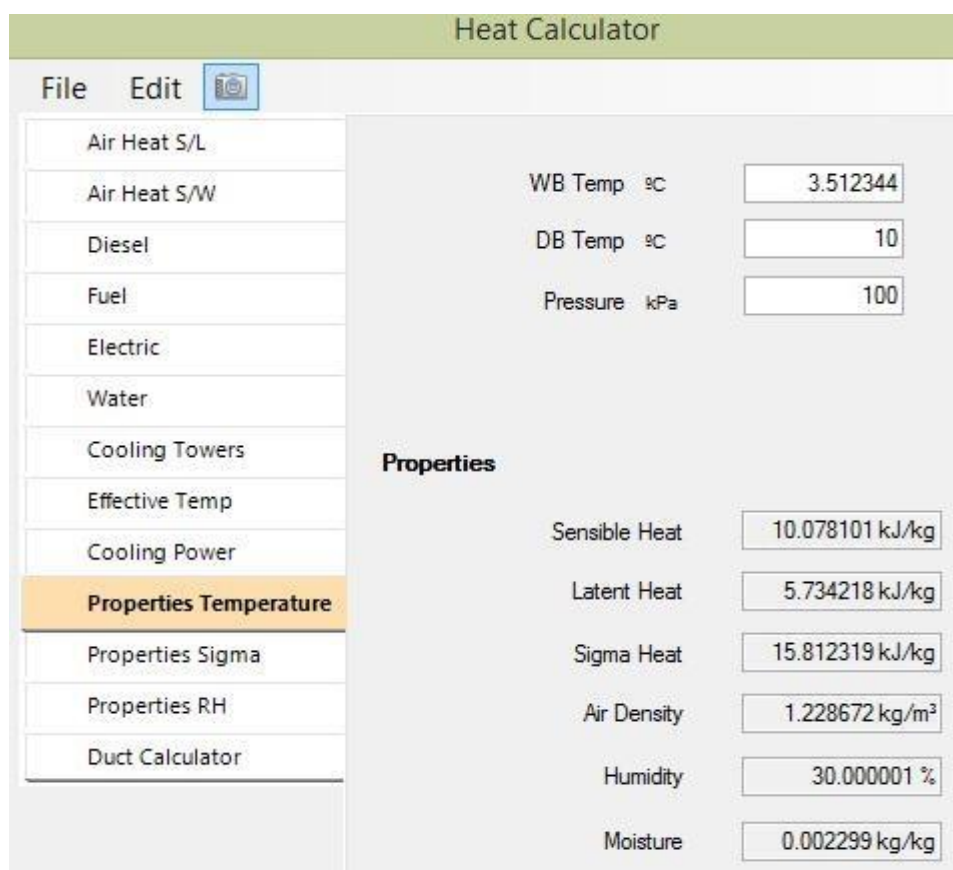
$$P_{vsd} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27 t_d}{237.3 + t_d}\right) = 1227.56053 \text{ Pa}$$

- چگالی هوا (Air Density)

$$\rho_m = \frac{P - 0.378 P_v}{287.04 T} = 1.22867215 \text{ kg/m}^3$$

- رطوبت نسبی (Humidity)

$$R_h = \frac{P_v}{P_{vsd}} = \%30.0000024$$



شکل ۴-۱۳ عملکرد نرم افزار Ventsim (5.2.6.8) در خصوص ظرفیت گرمایی ویژه هوا

۴-۳- تحلیل جریان گرما در کانال‌های مجاری باز

طبق شکل ۴-۱۴ و ۴-۱۵ در نرم افزار Ventsim تحلیل جریان گرما در ایستگاه منبع آب

مطرح شده است ولی تحلیل جریان گرما در کانال‌های مجاری باز برای هر شاخه مشاهده نمی‌شود. بر

این اساس طبق شکل ۳-۲۶ این تحلیل در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design تعریف شده است که از مزایای این برنامه است.

۴-۴-۴- تحلیل جریان گرمای حاصل از انفجار مواد منفجره

طبق شکل ۴-۱۵ در نرم‌افزار Ventsim تحلیل جریان گرمای حاصل از انفجار مواد منفجره برای هر شاخه مشاهده نمی‌شود ولی طبق شکل ۳-۲۸ این تحلیل در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design تعریف شده است که از مزایای آن می‌باشد.

۴-۴-۵- تحلیل جریان گرمای حاصل از پرسنل

طبق شکل ۴-۱۵ در نرم‌افزار Ventsim تحلیل جریان گرمای حاصل از فعالیت پرسنل در حفاریات زیرزمینی مشاهده نمی‌شود. ولی طبق شکل ۳-۳۰ این تحلیل در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design تعریف شده است که از مزایای این برنامه است.

شکل ۴-۱۴ عملکرد نرم‌افزار Ventsim (5.2.6.8) در خصوص ایستگاه منبع آب

Tools Select

Heat

Heat ☒ On

Heat Preset

Point Source

Heat Sensible (kW)	Custom
Heat Latent (kW)	Conveyor Linear 350 w/m
Refrigeration (kW)	Crusher Station 500kW Electric
Moisture (ml/sec)	Diesel Truck 350kW @ 50%
Diesel Engine (kW)	Pump Station 300kW Electric 90% efficient
	Refrigeration Plant 500kW

Linear Source

Heat Sensible (W/m)	
Heat Latent (W/m)	0.0
Moisture (g/s/m)	0.0
Oxidisation (W/m)	0.0
Diesel Engine (kW/m)	0.00

Fuel Burn

Fuel Burn Preset	
Point Burn (l/hour)	0
Linear Burn (l/h/100m)	0.0

Rock

Rock Type Preset	
Conductivity (W/mC)	4.50
Diffusivity (m ² /s 10 ⁻⁶)	2.153
Specific Heat (J/kgC)	950.000000
Rock Density (kg/m ³)	2,200.0

Fixed Data

Diesel Emission (g/kW.hr)	0.100
Advance Rate (m/mth)	0.0
Air Temperature (Wet-bulb) (°C)	17.846520
Air Temperature (Dry-bulb) (°C)	24.999850
Fixed \ Threshold	Fixed

Rock Surface

Wetness Fraction Preset	Very Dry
Wetness Fraction	0.02
Age Entry (year)	0.250000
Date Mined Entry	ژوئیه-2020
Age Exit (year)	0.250000
Date Mined Exit	ژوئیه-2020
VRT Temperature 1 (°C)	25.000000
VRT Temperature 2 (°C)	25.000000
Exposed Surface 1 (°C)	25.000000
Exposed Surface 2 (°C)	24.999860

Fix Heat/Humidification

Fixed Dry Bulb Temperature (°C)	0.000000
Fixed Humidity (°C)	0.000000

شکل ۴-۱۵ عملکرد نرم افزار Ventsim (5.2.6.8) در خصوص انواع مدل های گرمایی

۴-۴-۶- تحلیل جریان گرما در طول نوار نقاله

طبق شکل ۴-۱۵ در نرم افزار Ventsim مقدار جریان گرما در طول نوار نقاله را بر عهده کاربر گذاشته ولی طبق شکل ۳-۲۹ این تحلیل در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design با تعریف ظرفیت باربری نوار نقاله توسط برنامه محاسبه شده که از مزایای آن می‌باشد.

۴-۵- محدودیت‌های نرم افزار Ventsim

نرم افزار Ventsim در مدل تراکم‌ناپذیری برپایه یکی از روش‌های هاردی کراس طراحی شده و از سایر روش‌های دیگر بی‌بهره است که این مورد از محدودیت‌های این نرم افزار است. همچنین در این نرم افزار برای حل انواع معادلات ترمودینامیکی، محاسبات متعددی در دستور Heat Calculator طبق شکل‌های ۴-۱۶ و ۴-۱۷ تعریف شده که عملکرد برخی از این دستورات موازی هم است ولی نتایج آن‌ها کاملاً با هم یکسان نیستند. بنابراین مورد مذکور به عنوان یکی دیگر از محدودیت‌های نرم افزار Ventsim مطرح می‌شود. در شکل‌های ۴-۱۶ با وارد کردن اطلاعات ورودی یکسان از دمای دماسنج مرطوب، دمای دماسنج خشک، فشار هوا و رطوبت نسبی به ترتیب برابر $3/512344$ درجه سانتی‌گراد، 10 درجه سانتی‌گراد، 100 کیلو پاسکال و 30 درصد سبب تولید نتایج مختلف در دو دستور موازی شده که این اختلافات مربوط به مقادیر محاسبه شده برای گرمای محسوس (Sensible Heat)، گرمای نهان (Latent Heat)، گرمای سیگما (Sigma Heat)، چگالی هوا (Air Density) و نسبت رطوبت (Moisture) است که در شکل‌های ۴-۱۵ کاملاً مشهود است. همچنین در شکل‌های ۴-۱۷ با وارد کردن اطلاعات ورودی یکسان از دمای دماسنج مرطوب هوای ورودی و خروجی به ترتیب برابر 20 و 22 درجه سانتی‌گراد، دمای دماسنج خشک هوای ورودی و خروجی به ترتیب برابر 30 و 32 درجه سانتی‌گراد، فشار هوای ورودی و خروجی به ترتیب برابر 103 و 102 کیلو پاسکال و شدت جریان حجمی 10 متر مکعب بر ثانیه سبب تولید نتایج مختلف در دو دستور موازی شده که این اختلافات مربوط به مقادیر محاسبه شده برای گرمای محسوس است که در شکل‌های ۴-۱۷ کاملاً مشهود است.

Heat Calculator

File Edit

Air Heat S/L
Air Heat S/W
Diesel
Fuel
Electric
Water
Cooling Towers
Effective Temp
Cooling Power
Properties Temperature
Properties Sigma
Properties RH
Duct Calculator

WB Temp °C

DB Temp °C

Pressure kPa

Properties

Sensible Heat

Latent Heat

Sigma Heat

Air Density

Humidity

Moisture

(الف)

Heat Calculator

File Edit

Air Heat S/L
Air Heat S/W
Diesel
Fuel
Electric
Water
Cooling Towers
Effective Temp
Cooling Power
Properties Temperature
Properties Sigma
Properties RH
Duct Calculator

RH %

DB Temp °C

Pressure kPa

Properties

Sensible Heat

Latent Heat

Sigma Heat

Air Density

Wet Bulb

Moisture

(ب)

شکل ۴-۱۶ نتایج اولین عملکرد دستورات موازی در نرم افزار Ventsim (5.2.6.8)

Heat Calculator

File Edit

Air Heat S/L			
Air Heat S/W			
Diesel			
Fuel			
Electric			
Water			
Cooling Towers			
Effective Temp			
Cooling Power			
Properties Temperature			
Properties Sigma			
Properties RH			
Duct Calculator			

	INLET	OUTLET
WB Temp °C	20.000000	22
DB Temp °C	30.000000	32
Pressure kPa	103	102
Air flow m³/s	10.0	

Estimated Heating / Cooling

Sensible Heat	24.589910 kW
Latent Heat	60.519940 kW

Heat Calculator

File Edit

Air Heat S/W			
Air Heat S/L			
Diesel			
Fuel			
Electric			
Water			
Cooling Towers			
Effective Temp			
Cooling Power			
Properties Temperature			
Properties Sigma			
Properties RH			
Duct Calculator			

	INLET	OUTLET
WB Temp °C	20.000000	22
DB Temp °C	30.000000	32
Pressure kPa	103	102
Air flow m³/s	10.0	

Estimated Heating / Cooling

Sensible Heat	85.109850 kW
Water	24.94 ml/sec

(الف)

(ب)

شکل ۴-۱۷ نتایج دومین عملکرد دستورات موازی در نرم افزار Ventsim (5.2.6.8)

فصل پنجم

نتیجه گیری

۵-۱- نتیجه‌گیری

طراحی تهویه در معادن در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری انجام می‌شود. دما و چگالی هوا از پارامترهای مهم در طراحی تهویه معادن محسوب می‌شوند که سایر پارامترهای دیگر را تحت تاثیر خود قرار می‌دهند. در طراحی تهویه با استفاده از مدل تراکم‌ناپذیر بودن سیال هوا فرض می‌شود که دو پارامتر دما و چگالی هوا همواره ثابت است و همچنین مقادیر ورودی و خروجی هوا در طرح تهویه با هم برابرند. اما در طراحی تهویه با استفاده از مدل تراکم‌پذیر بودن سیال هوا فرض می‌شود که دو پارامتر دما و چگالی هوا ثابت نیستند و همچنین مقادیر ورودی و خروجی هوا در طرح تهویه با هم برابر نیستند.

برای تحلیل شبکه تهویه در معادن در مدل تراکم‌ناپذیری روش‌های مختلفی همچون روش هاردی کراس، هاردی کراس مدل ونگ، هاردی کراس مدل حلقه فضایی، هاردی کراس مدل افزایی و مدنی، مدل تلفیقی هاردی کراس، مدل نیوتنی هاردی کراس، مرتبه سوم نیوتنی هاردی کراس، مرتبه شانزدهم نیوتنی هاردی کراس، نیوتن رافسون مدل ونگ و نیوتن رافسون با جهت‌های متغیر ارائه شده است. هر یک از روش‌های فوق از مزایا و معایبی برخوردار هستند. همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی از اهداف اصلی در بین محققین محسوب می‌شود. بر این اساس در این رساله، شبکه‌های مختلف تهویه و مطالعات موردی انجام شد که نشان می‌دهند دو مدل تلفیقی هاردی کراس و نیوتن-رافسون با جهت‌های متغیر از اطمینان بیشتری برای رسیدن به جواب نهایی برخوردار هستند. بنابراین در این رساله جهت همگرایی سریع‌تر به جواب نهایی بر اساس مدل تلفیقی هاردی کراس، روش جدیدی تحت عنوان دومین مدل تلفیقی هاردی کراس ارائه شد. همچنین در این رساله جهت سهولت

کاربرد روش نیوتن-رافسون با جهت‌های متغیر، روش جدیدی تحت عنوان روش نیوتن-رافسون بدون مشتق ارائه شد. همچنین در این رساله نشان داده شد که روش‌های نیوتنی برای تفسیر شبکه‌هایی با وجود فشار فن از ضعف‌هایی برخوردار هستند بر این اساس سه روش اصلاح شده نیوتنی در این رساله ارائه شدند.

طراحی تهویه در معادن از دیدگاه سیال تراکم پذیر در دو مدل هوای خشک و هوای مرطوب انجام می‌شود. همچنین در مدل تراکم‌پذیری، دما و چگالی هوا در هر مترژی از طول حفاری در حال تغییر است. بنابراین معادلات حاکم بر این مدل، تفسیر مشخصات هوای خروجی همچون دما، چگالی، سرعت، فشار و رطوبت آنی از طول حفاری است. برای تفسیر مدل هوای خشک نیاز به حل یک معادله غیرخطی است که از دیدگاه علم ریاضی جواب نهایی آن به سهولت برآورد می‌شود. ولی برای تفسیر مدل مرطوب نیاز به حل دو معادله غیرخطی است که برای حل این دو معادله از روش‌های تقریبی ریاضی استفاده می‌شود. روش‌های تقریبی ریاضی برپایه مشتق سبب حجیم شدن معادلات و طولانی شدن زمان انجام محاسبات ریاضی می‌شود. بر این اساس در این رساله سه روش جدید با نام‌های روش دلتا (Δ)، روش K و روش K-W برای سهولت تفسیر طراحی تهویه در مدل تراکم‌پذیری ارائه شده است. دو روش اول با فرض معلوم بودن مقدار تبخیر بخار آب و روش سوم با فرض مجهول بودن مقدار تبخیر بخار آب در طول حفاری برای تحلیل مدل هوای مرطوب ارائه شده است.

در این رساله برای کاهش خطا و افزایش دقت انجام محاسبات ریاضی برای طراحی تهویه در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری، یک برنامه ریزانه‌ای تحت ویندوز با عنوان Ventilation Design در محیط برنامه نویسی Visual C++ 6 ارائه شده است. اعتبارسنجی درونی و بیرونی این برنامه ریزانه‌ای که در فصل چهارم انجام شده است بیانگر این مطلب است که نتایج خروجی آن کاملاً صحیح است.

نتایج کلی حاصل شده از این رساله به شرح ذیل بیان می‌شوند:

۱- ارائه دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس، طبق نتایج حاصل شده از جدول ۴-۲۰ مربوط به مطالعات موردی، دومین مدل تلفیقی روش هاردی کراس به عنوان سریع‌ترین روش در بین

روش‌های هاردی کراس از دیدگاه حداقل تعداد تکرار محاسبات ریاضی و زمان انجام محاسبات ریاضی است زیرا در این مدل تعریف دقیق‌تری از انواع حلقه و شاخه در شبکه تهویه ارائه شده است.

۲- ارائه روش نیوتن-رافسون بدون مشتق، با حذف مشتقات متوالی در روش نیوتن-رافسون مدل ونگ و ارائه روش نیوتن-رافسون بدون مشتق سبب کاهش حجم محاسبات ریاضی و سهولت کاربرد روش جدید نیوتن-رافسون در تحلیل شبکه‌های تهویه معادن شده است. طبق نتایج حاصل شده از جدول ۴-۲۰ مربوط به مطالعات موردی، روش نیوتن-رافسون بدون مشتق به عنوان سریع‌ترین روش در بین همه روش‌های هاردی کراس و نیوتن-رافسون از نظر زمان انجام محاسبات ریاضی است.

۳- ارائه روش‌های اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس، با اعمال تصحیحات لازم در ماتریس‌های مربوط به سه روش نیوتنی هاردی کراس سبب رفع ضعف‌های آن روش‌ها شده و نهایتاً سه روش اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس ارائه شده‌اند. نتایج حاصل شده از جداول ۴-۱۵ و ۴-۱۸ بیانگر این مطلب هستند که روش‌های اصلاح شده نیوتنی هاردی کراس از عملکرد بهتری نسبت به روش‌های قبلی خود برخوردارند.

۴- ارائه روش دلتا (Δ)، طبق نتایج حاصل شده از جدول ۳-۶ بیانگر این مطلب است که روش دلتا (Δ) سبب سهولت و تسریع حل معادلات ترمودینامیکی در مدل هوای مرطوب تراکم‌پذیر نسبت به روش نیوتن-رافسون می‌شود.

۵- ارائه روش K، طبق نتایج حاصل شده از جدول ۳-۷ بیانگر این مطلب است که روش K سبب تسریع حل معادلات ترمودینامیکی نسبت به روش دلتا (Δ) در مدل هوای مرطوب تراکم‌پذیر می‌شود.

۶- ارائه بهبود روابط ترمودینامیکی، طبق مسائل مطرح شده در بخش ۳-۴-۴ بهبود روابط ترمودینامیکی برای تحلیل شبکه‌های تهویه معادن الزامی است. بنابراین روابط بهبود یافته در شماره‌های ۳-۴۶ تا ۳-۵۲ ارائه شده‌اند.

۷- ارائه روش K-W، طبق بهبود روابط ترمودینامیکی برای تحلیل شبکه‌های تهویه معادن لازم است تا اصلاحاتی در روش دلتا (Δ) و روش K ایجاد شود بر این اساس روش K-W ارائه شده است. طبق نتایج حاصل شده از جدول ۳-۱۰ بیانگر این مطلب است که روش K-W از عملکرد بهتری نسبت به دو روش دلتا (Δ) و روش K برخوردار است.

۸- ارائه برنامه رایانه‌ای Ventilation Design برای سهولت و کاهش خطا در حل معادلات حاکم بر طراحی تهویه معادن در دو مدل تراکم‌ناپذیری و تراکم‌پذیری.

۵-۲- پیشنهادات

ارائه برنامه رایانه‌ای Ventilation Design به عنوان نتیجه نهایی این رساله مطرح است ولی این برنامه از محدودیت‌هایی برخوردار است. رفع محدودیت‌های برنامه رایانه‌ای Ventilation Design به عنوان پیشنهاداتی در این رساله مطرح می‌شود. محدودیت اول در خصوص برآورد مقدار گازخیزی گاز متان از لایه‌های زغالسنگ و نحوه گاززدایی از آن‌ها به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای طراحی تهویه معادن زغالسنگ مطرح است که از دیدگاه علمی وابسته به مقادیر خاکستر زغالسنگ، رطوبت زغالسنگ و مواد فرار درون زغالسنگ است و همچنین محدودیت دوم مربوط به نمایش گرافیکی است که در این برنامه رایانه‌ای لحاظ نشده است. بنابراین پیشنهادات آتی در این رساله به شرح ذیل مطرح می‌شود:

الف- روش‌های مختلف برآورد مقدار گازخیزی گاز متان و گاززدایی آن در خصوص معادن زغالسنگ به برنامه رایانه‌ای Ventilation Design اضافه شود.

ب- نمایش گرافیکی برای برنامه رایانه‌ای Ventilation Design اضافه شود.

منابع و مراجع

منابع

افرائی، س؛ مدنی، ح، (۱۳۹۱) "بررسی عوامل موثر بر همگرایی روش هاردی کراس در تحلیل شبکه‌های تهویه معادن"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره هفتم، شماره هفدهم، صفحه ۱۵-۲۱.

الهی، ا، (۱۳۹۳ الف) "اصول طراحی تهویه در معادن"، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.

الهی، ا، (۱۳۹۳ ب) "بهبود روش هاردی کراس در تحلیل شبکه تهویه فضاهای زیرزمینی"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره سوم، شماره دوم، صفحه ۱۰۱-۱۱۷. الهی، ا؛ زینلی، ح؛ امینی، ا، (۱۳۹۴) "طراحی تهویه معدن بزرگ با استفاده از روش حلقه‌ای"، اولین کنفرانس مهندسی معدن، فلزات و مواد، صفحه ۱-۱۱.

الهی، ا، (۱۳۹۸) "توسعه روش نیوتن رافسون با جهت‌های متغیر برای تحلیل شبکه‌های تهویه فضاهای زیرزمینی"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره هشتم، شماره اول، صفحه ۱۵-۲۸.

مدنی، ح، (۱۳۸۵) "تهویه در معادن"، جلد اول، چاپ پنجم، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی.

مدنی، ح، (۱۳۸۲) "تهویه در معادن"، جلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

مدنی، ح؛ ملکی، ب، (۱۳۸۶) "تحلیل شبکه تهویه معدن با استفاده از روش نیوتن- رفسون بر پایه معادلات DQ"، نشریه علمی- پژوهشی دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دوره شست و ششم، صفحه ۹۷-۱۰۲.

- Arsene, CTC., Bargiela, A., and Al-Dabass, D., (2004) “Modelling and simulation of water systems based on loop equations”. *Int J Simul*, 5(1-2): 61–72.
- Ayad, A., Awad, H., and Yassin, A., (2013) “Developed hydraulic simulation model for water pipeline networks”, *Alexandria Eng. J.*, 52: 43–49.
- Basha, HA., and Kassab, BG., (1996) “Analysis of water distribution systems using a perturbation method”. *Appl Math Model*, 20(4):290–7.
- Bhamidipati, S. S., and Procarione, J. A., (1985) “Linear Analysis for the Solution of Flow Distribution Problems”. *Proceedings of the 2nd US Mine Ventilation Symposium*, Mousset_Jones, P. (Ed.), Rotterdam, Netherlands, pp. 645-654.
- Boanoa, F., Scibettab, M., Ridolfia, L., and Giustolisic, O., (2015) “Water distribution system modeling and optimization: a case study”, *Procedia Engineering*, 119, 719 – 724
- Boulos, PF., Lansey, KE., and Karney, BW., (2006) “Comprehensive water distribution systems analysis handbook for engineers and planners”. 2nd., MWH: Hardback.
- Brkic, D., (2009) “An improvement of Hardy Cross method applied on looped spatial natural gas distribution networks”. *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1290-1300.
- Bruce E. Larock, Roland W. Jeppson, Gary Z. Watters., (2000) “Hydraulics of Pipeline Systems”, CRC Press LLC.
- Cazenave, Anny., (1995) “Geoid, Topography and Distribution of Landforms”. In Ahrens, Thomas J. *Global earth physics a handbook of physical constants*. Washington, DC: American Geophysical Union. ISBN 0-87590-851-9. Archived from the original on 2006-10-16. Retrieved 2008-08-03.
- Chiplunkar, AV., Mehndiratta, SL., and Khanna, P., (1990) “Analysis of looped water distribution networks”. *Environ Softw*, 5(4): 202–6.
- Coelho, PM., and Pinho, C., (2007) “Considerations about equations for steady state flow in natural gas pipelines”. *J Brazil Soc Mech Sci Eng*, 29(3):262–73.
- Collins, M., Cooper, L., Helgason, R., Kennington, J., and LeBlanc, L., (1978) “Solving the Pipe Network Analysis Problem Using Optimization Techniques”. *Management Science*, Vol. 24, pp. 747-760.
- Creacoa, E., and Franchinib, M., (2015) “The identification of loops in water distribution networks”, *Procedia Engineering*, 119, 506 – 515.
- Cross, H., (1936) “Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors”. *Bulletin 286*, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbane, 29 pp.

- Dandy, G. C., Simpson, A. R., and Murphy, L. J., (1996) "An improved genetic algorithm for pipe network optimization", *Water Resources Research*, 32 (2), 449-458.
- Darvishi, M. and Barati, A., (2007) "A third-order newton-type method to solve systems of nonlinear equations", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 187, No. 2, 630-635.
- Eiger, GU., Shamir, U., and Ben-Tal, A., (1994) "Optimal design of water distribution networks". *Water Resour Res*, 30(9): 2637–46.
- El-Nagdy, Kh.A., (2008), Ph.D thesis, "Analysis of Complex Ventilation Networks in Multiple Fan Coal Mine", West Virginia University.
- Giustolisi, O., (2010) "Considering actual pipe connections in water distribution network analysis", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 11, 889-900.
- Giustolisi, O. and Moosavian, N., (2014) "Testing linear solvers for global gradient algorithm", 1-12.
- Gupta, I., Bassin, JK., Gupta, A., and Khanna, P., (1993) "Optimization of water distribution system". *Environ Softw*, 8(2): 101–13.
- Gupta, I., Gupta, A., and Khanna, P., (1999) "Genetic algorithm for optimization of water distribution systems", *Environmental Modelling & Software*, 14 (5)-437e446.
- Hall, C.J. (1998) "Mine Ventilation Engineering". S.M.F., INC.
- Hu, W., and Longson, I., (1990) "The Optimization of Airflow Distribution in Ventilation Networks Using A Nonlinear Programming Method". *Mining Science and Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 209-219.
- Jha, K., and Mishra, M.K., (2018) "Modified Newton-Raphson Technique for Integrated Object-Oriented Water Pipe Network Analysis", ^{1st} International WDSA / CCWI, Joint Conference, Kingston, Ontario, Canada , 23-25.
- Kamba, G. M., Jacques, E., and 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*, Wala, A. M. (Ed.), SME, Littleton, Co., pp. 461-465.
- Li, X., Mu, C., Ma, J. and Wang, C., (2010) "Sixteenth-order method for nonlinear equations", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 215, No. 10, 3754-3758.
- McPherson, M.J., (1993) "Subsurface Ventilation and Environmental Engineering",

- Champan & Hall, 184.
- Michele, G., Zoran, K. and Dragan, S., (2012) “Using high performance techniques to accelerate demand driven hydraulic solvers”.
- Moosavian, N. and Jaefarzadeh, M. R., (2014a) “Hydraulic analysis of water distribution network using shuffled complex evolution”, *Journal of Fluids*, Vol. 2014, 1-12.
- Moosavian, N., and Jaefarzadeh, M. R., (2014b) “Hydraulic Analysis of Water Supply Networks Using a Modified Hardy Cross Method”, *International Journal of Engineering*, Vol. 27, No. 9, 1331-1338.
- Bhave, P.R., (1991) “Analysis of Flow in Water Distribution Networks”, Technomic Pub. Co.
- Savic, D.A., and Walters, G.A., (1997) “Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks”, *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 123 (2), 67-77.
- Singh, M., Kheer, S.K., and Pandita, I.K., (2016) “Improvement of water distribution networks analysis by topological similarity”, *Alexandria Engineering Journal*, 55, 1375–1383.
- Todini, E., (2000) “Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach”. *Urban Water*, 2(2):115–22.
- Wang, Y. J., (1982a) “Ventilation Network Theory,. *Mine Ventilation and Air Conditioning*”. 2nd ed., H. L. Hartman (Ed.), Wiley-Interscience, NY, pp. 167-195.
- Wang, Y. J., (1982b) “Critical Path Approach to Mine Ventilation Networks with Controlled Flow”. *Trans. SME-AIME*, Vol. 272, pp. 1862-72.
- Wang, Y. J., (1984) “A Non-Linear Programming Formulation for Mine Ventilation Networks with Natural Splitting”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 21, No. 1, pp. 42-3-45.
- Wang, Y. J., (1989) “A Procedure for Solving A More Generalized System of Mine Ventilation Network Equations”. *Proceedings of the 4th US. Mine Ventilation Symposium*, SME, Littleton, Co., pp. 419-424.
- www.sibenergomash.com.
- www.vacuumkaran.com
- Zecchin, AC., Simpson, AR., Maier, HR., Leonard, M., Roberts, AJ., and Berrisford,

MJ., (2006) “Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation”. Math Comput Model, 44(4-5):451–68.

پیوست

پیوست ۱: فایل گره در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design مربوط به معدن بزرگ

20	2
13	1
11	1
7	1
3	1
2	1
5	1
32	1
85	1
89	1
91	1
35	1
36	1
38	1
43	1
39	1
40	1
60	1
59	1
22	1
31	1
21	1
14	1
48	1
49	1
64	1
51	1
52	1
55	1
56	1
73	1
100	1
101	1

پیوست ۲: فایل شاخه در برنامه رایانه‌ای Ventilation Design مربوط به معدن بزرگ

2	20	0.1	5	0
20	13	0.4	5	280
13	11	0.2	4	0
11	7	0.1	2	0
7	5	0.1	1	0
5	3	0.2	1	0
7	3	0.4	1	0
3	2	0.1	2	0
13	14	0.3	1	0
14	2	0.1	3	0
11	32	0.1	2	0
35	32	0.3	1	0
32	85	0.3	3	0
35	38	0.1	1	0
38	36	0.2	2	0
36	35	0.1	2	0
39	38	0.1	1	0
40	39	0.1	2	0
39	100	0.1	1	0
40	43	0.3	1	0
43	85	0.3	2	0
60	43	0.3	1	0
60	64	0.4	1	0
85	89	0.2	5	0
55	89	0.3	1	0
89	91	0.2	6	0
91	100	0.1	6	0
31	21	0.1	1	0
21	14	0.1	2	0
31	22	0.1	5	0
22	73	0.8	1	0
22	59	1.4	4	0
59	56	0.3	2	0
59	60	0.1	2	0
48	40	0.1	3	0
49	48	0.1	1	0
64	48	0.1	2	0
51	64	0.1	1	0
51	49	0.2	1	0
52	51	0.1	2	0
73	52	0.1	1	0
56	55	0.1	2	0
55	52	0.3	1	0
101	31	0.1	6	0
100	101	0.1	7	0
101	21	0.1	1	0

پیوست ۳: فایل حلقه در مدل کلاسیک از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design مربوط به

معدن بزرگ

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	-1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	-1	1	1	-1	0	0	0	0	0	0
	0										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0										
0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
	1										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1
	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	-1	0	0
	0										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	1	0	1	1	1	1	0	-1	-1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0
	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	0
	0										

ادامه پیوست ۳: فایل حلقه در مدل کلاسیک از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design مربوط

به معدن بزرگ

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1
	0										
0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	-1	1
	0	-1	0	0	1	0	-1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
	-1										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-1
	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
	0										
0	0	0	-1	-1	-1	0	-1	0	1	1	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	0										
1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	1	1	1	-1	0	1	0	1	0	1
	0	0	0	-1	0	-1	0	0	-1	0	1
	1										

پیوست ۴: نتایج فایل خروجی Final Incompressible از برنامه رایانه‌ای Ventilation

Design مربوط به معدن بزرگ (مدل اول) به روش نیوتن - رافسون بدون مشتق

-----Final Results of Incompressible Model-----

Accuracy of Calculations: 1E-9

Q(2-20)	Q(20-13)	Q(13-11)	Q(11-7)	Q(7-5)	Q(5-3)
21.573462	21.573462	11.542405	8.494379	4.552124	4.552124
Q(5-3)	Q(7-3)	Q(3-2)	Q(13-14)	Q(14-2)	Q(11-32)
4.552124	3.942255	8.494379	10.031056	13.079083	3.048026
Q(35-32)	Q(32-85)	Q(35-38)	Q(38-36)	Q(36-35)	Q(39-38)
-1.446054	1.601972	0.916762	-0.529293	-0.529293	-1.446054
Q(40-39)	Q(39-100)	Q(40-43)	Q(43-85)	Q(60-43)	Q(60-64)
-0.194673	1.251381	-0.264107	-0.666943	-0.402836	-0.017949
Q(85-89)	Q(55-89)	Q(89-91)	Q(91-100)	Q(31-21)	Q(21-14)
0.935029	-0.270900	0.664128	0.664128	1.501660	3.048026
Q(31-22)	Q(22-73)	Q(22-59)	Q(59-56)	Q(59-60)	Q(48-40)
-1.132517	-0.625688	-0.506830	-0.086044	-0.420785	-0.458781
Q(49-48)	Q(64-48)	Q(51-64)	Q(51-49)	Q(52-51)	Q(73-52)
-0.202256	-0.256524	-0.238575	-0.202256	-0.440831	-0.625688
Q(56-55)	Q(55-52)	Q(101-31)	Q(100-101)	Q(101-21)	
-0.086044	0.184856	0.369143	1.915509	1.546366	
delta(Q1)	delta(Q2)	delta(Q3)	delta(Q4)	delta(Q5)	delta(Q6)
-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000
delta(Q7)	delta(Q8)	delta(Q9)	delta(Q10)	delta(Q11)	delta(Q12)
0.000000	-0.000000	-0.000000	-0.000000	0.000000	-0.000000
delta(Q13)	delta(Q14)				
-0.000000	0.000000				

پیوست ۵: نتایج فایل خروجی Total Incompressible از برنامه رایانه‌ای Ventilation

Design مربوط به معدن رزمجا غربی به روش نیوتن - رافسون بدون مشتق

-----Total Results of Incompressible Model (Stage by Stage)-----

Accuracy of Calculations: 1.000000E-009

Num	Q(1-2)	Q(2-5)	Q(5-7)	Q(7-8)	Q(8-5)
1	36.646620	22.457972	12.475942	3.063116	-9.982030
	Q(2-10)	Q(10-8)	Q(10-23)	Q(7-23)	Q(23-24)
	14.188647	-13.045146	27.233793	9.412826	36.646620
	delta(Q1)	delta(Q2)	delta(Q3)	delta(Q4)	
	0.825652	4.951884	34.915945	53.293239	
2	Q(1-2)	Q(2-5)	Q(5-7)	Q(7-8)	Q(8-5)
	29.002304	18.980568	10.424660	1.866129	-8.555908
	Q(2-10)	Q(10-8)	Q(10-23)	Q(7-23)	Q(23-24)
	10.021736	-10.422037	20.443773	8.558530	29.002304
	delta(Q1)	delta(Q2)	delta(Q3)	delta(Q4)	
3	Q(1-2)	Q(2-5)	Q(5-7)	Q(7-8)	Q(8-5)
	27.877193	18.675008	10.163611	1.529832	-8.511398
	Q(2-10)	Q(10-8)	Q(10-23)	Q(7-23)	Q(23-24)
	9.202185	-10.041230	19.243414	8.633779	27.877193
	delta(Q1)	delta(Q2)	delta(Q3)	delta(Q4)	
4	Q(1-2)	Q(2-5)	Q(5-7)	Q(7-8)	Q(8-5)
	27.842153	18.670794	10.149963	1.501052	-8.520831
	Q(2-10)	Q(10-8)	Q(10-23)	Q(7-23)	Q(23-24)
	9.171359	-10.021883	19.193242	8.648911	27.842153
	delta(Q1)	delta(Q2)	delta(Q3)	delta(Q4)	
5	Q(1-2)	Q(2-5)	Q(5-7)	Q(7-8)	Q(8-5)
	27.842080	18.670744	10.149853	1.500841	-8.520890
	Q(2-10)	Q(10-8)	Q(10-23)	Q(7-23)	Q(23-24)
	9.171336	-10.021732	19.193068	8.649012	27.842080
	delta(Q1)	delta(Q2)	delta(Q3)	delta(Q4)	
6	Q(1-2)	Q(2-5)	Q(5-7)	Q(7-8)	Q(8-5)
	27.842080	18.670744	10.149853	1.500841	-8.520890
	Q(2-10)	Q(10-8)	Q(10-23)	Q(7-23)	Q(23-24)
	9.171336	-10.021732	19.193068	8.649012	27.842080
	delta(Q1)	delta(Q2)	delta(Q3)	delta(Q4)	
7	Q(1-2)	Q(2-5)	Q(5-7)	Q(7-8)	Q(8-5)
	27.842080	18.670744	10.149853	1.500841	-8.520890
	Q(2-10)	Q(10-8)	Q(10-23)	Q(7-23)	Q(23-24)
	9.171336	-10.021732	19.193068	8.649012	27.842080
	delta(Q1)	delta(Q2)	delta(Q3)	delta(Q4)	

پیوست ۶: نتایج فایل خروجی Total Compressible از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design

برای روش K-W مربوط به مثال بخش ۳-۴-۵

-----Total Results of Compressible Model (Stage by Stage)-----

-----Properties of Inlet Air-----

$Q_1=49.480202 \text{ m}^3/\text{s}$	$P_{\text{vsd}1}=4241.675712 \text{ Pa}$	$P_{\text{v}1}=1060.418928 \text{ Pa}$
$w_1=0.006818 \text{ kg/kg}$	$C_{p1}=1005.209719 \text{ J/kgK}$	$r_1=1.119387 \text{ kg/m}^3$
$R_1=288.221221 \text{ J/kgK}$	$R_{h1}=25.000000$	

-----Properties of Metabolik Heat-----

$q=50.000000 \text{ kw}$	Total Heat=50.000000 kw
--------------------------	-------------------------

-----Total Results of K-W Method (SI)-----

$v_1=7.000000 \text{ m/s}$	$v_2=7.700000 \text{ m/s}$	$t_1=30.000000 \text{ c}$
$t_2=33.000000 \text{ c}$	$p_1=97805.640625 \text{ Pa}$	$p_2=107586.204688 \text{ Pa}$
$g_1=9.797401 \text{ m/s}^2$	$g_2=9.800482 \text{ m/s}^2$	$w_1=0.006818 \text{ kg/kg}$
$w_2=0.007499 \text{ kg/kg}$		
$e_p=-9861.328761 \text{ J/kg}$	$e_k=5.181831 \text{ J/kg}$	$Ah_v+Bh_w=1692.652565 \text{ J/kg}$
$f_{12}=35.477600 \text{ J/kg}$	$v_2=7.700000 \text{ m/s}$	$t_2=35.477600 \text{ c}$
$M=55.012450 \text{ kg/s}$	$k=1.226417$	$p_2=108402.492141 \text{ Pa}$
$r_2=1.217099 \text{ kg/m}^3$	$r_1=1.119387 \text{ kg/m}^3$	$v_2=6.436807 \text{ m/s}$
$w_2=0.008955 \text{ kg/kg}$	$R_{h2}=26.6594$	$r_{d1}=1.111807 \text{ kg/m}^3$
$r_{d2}=1.209086 \text{ kg/m}^3$	$cp_1=1005.209719 \text{ J/kgK}$	
$c_{p2}=1005.497255 \text{ J/kgK}$	$r_d=1.158408 \text{ kg/m}^3$	
$e_p=-9868.453416 \text{ J/kg}$	$e_k=-3.813597 \text{ J/kg}$	$Ah_v+Bh_w=5255.815224 \text{ J/kg}$
$f_{12}=35.486550 \text{ J/kg}$	$v_2=6.436807 \text{ m/s}$	$t_2=35.486550 \text{ c}$
$M=55.012450 \text{ kg/s}$	$k=1.257193$	$p_2=108553.617145 \text{ Pa}$
$r_2=1.218761 \text{ kg/m}^3$	$r_1=1.119387 \text{ kg/m}^3$	$v_2=6.442894 \text{ m/s}$
$w_2=0.008955 \text{ kg/kg}$	$R_{h2}=26.6833$	$r_{d1}=1.111807 \text{ kg/m}^3$
$r_{d2}=1.207943 \text{ kg/m}^3$	$cp_1=1005.209719 \text{ J/kgK}$	
$c_{p2}=1005.497733 \text{ J/kgK}$	$r_d=1.157883 \text{ kg/m}^3$	
$e_p=-9868.453169 \text{ J/kg}$	$e_k=-3.774090 \text{ J/kg}$	$Ah_v+Bh_w=5255.798005 \text{ J/kg}$
$f_{12}=35.486511 \text{ J/kg}$	$v_2=6.442894 \text{ m/s}$	$t_2=35.486511 \text{ c}$
$M=55.012450 \text{ kg/s}$	$k=1.257210$	$p_2=108552.903980 \text{ Pa}$
$r_2=1.218753 \text{ kg/m}^3$	$r_1=1.119387 \text{ kg/m}^3$	$v_2=6.442935 \text{ m/s}$
$w_2=0.008955 \text{ kg/kg}$	$R_{h2}=26.6832$	$r_{d1}=1.111807 \text{ kg/m}^3$
$r_{d2}=1.207936 \text{ kg/m}^3$	$cp_1=1005.209719 \text{ J/kgK}$	
$c_{p2}=1005.497731 \text{ J/kgK}$	$rd=1.157880 \text{ kg/m}^3$	
$e_p=-9868.453170 \text{ J/kg}$	$e_k=-3.773824 \text{ J/kg}$	$Ah_v+Bh_w=5255.798081 \text{ J/kg}$
$f_{12}=35.486510 \text{ J/kg}$	$v_2=6.442935 \text{ m/s}$	$t_2=35.486510 \text{ c}$
$M=55.012450 \text{ kg/s}$	$k=1.257210$	$p_2=108552.899174 \text{ Pa}$
$r_2=1.218753 \text{ kg/m}^3$	$r_1=1.119387 \text{ kg/m}^3$	$v_2=6.442935 \text{ m/s}$
$w_2=0.008955 \text{ kg/kg}$	$R_{h2}=26.6832$	$r_{d1}=1.111807 \text{ kg/m}^3$
$r_{d2}=1.207936 \text{ kg/m}^3$	$cp_1=1005.209719 \text{ J/kgK}$	
$c_{p2}=1005.497731 \text{ J/kgK}$	$r_d=1.157880 \text{ kg/m}^3$	

ادامه پیوست ۶: نتایج فایل خروجی Total Compressible از برنامه رایانه‌ای Ventilation

Design برای روش K-W مربوط به مثال بخش ۳-۴-۵

$e_p = -9868.453170 \text{ J/kg}$	$e_k = -3.773822 \text{ J/kg}$	$Ah_v + Bh_w = 5255.798081 \text{ J/kg}$
$f_{12} = 35.486510 \text{ J/kg}$	$v_2 = 6.442935 \text{ m/s}$	$t_2 = 35.486510 \text{ c}$
$M = 55.012450 \text{ kg/s}$	$k = 1.257210$	$p_2 = 108552.899141 \text{ Pa}$
$r_2 = 1.218753 \text{ kg/m}^3$	$r_1 = 1.119387 \text{ kg/m}^3$	$v_2 = 6.442935 \text{ m/s}$
$w_2 = 0.008955 \text{ kg/kg}$	$R_{h2} = 26.6832$	$r_{d1} = 1.111807 \text{ kg/m}^3$
$r_{d2} = 1.207936 \text{ kg/m}^3$	$c_{p1} = 1005.209719 \text{ J/kgK}$	
$c_{p2} = 1005.497731 \text{ J/kgK}$	$r_d = 1.157880 \text{ kg/m}^3$	
$r = 1.169070 \text{ kg/m}^3$	$R = 288.404707 \text{ J/kgK}$	$v = 6.721468 \text{ m/s}$

پیوست ۷: نتایج فایل خروجی Final Compressible از برنامه رایانه‌ای Ventilation Design

برای روش K-W مربوط به مثال بخش ۳-۴-۵

-----Final Results of Compressible Model-----

-----Total Results of K-W Method (SI)-----

$v_1 = 7.000000 \text{ m/s}$	$t_1 = 30.000000 \text{ c}$	$P_1 = 97805.640625 \text{ Pa}$
$v_2 = 6.442935 \text{ m/s}$	$t_2 = 35.486510 \text{ c}$	$P_2 = 108552.899141 \text{ Pa}$
$g_1 = 9.797401 \text{ m/s}^2$	$w_1 = 0.006818 \text{ kg/kg}$	$R_{h1} = 25.000000$
$g_2 = 9.800482 \text{ m/s}^2$	$w_2 = 0.008955 \text{ kg/kg}$	$R_{h2} = 26.6832$
$r_1 = 1.119387 \text{ kg/m}^3$	$r_{d1} = 1.111807 \text{ kg/m}^3$	$r_d = 1.157880 \text{ kg/m}^3$
$r_2 = 1.218753 \text{ kg/m}^3$	$r_{d2} = 1.207936 \text{ kg/m}^3$	$M = 55.012450 \text{ kg/s}$
$cp_1 = 1005.209719 \text{ J/kgK}$	$cp_2 = 1005.497731 \text{ J/kgK}$	$q = 908.885 \text{ J/kg}$

پیوست ۸: مشخصات ترمودینامیکی گازها

Gas	Molecular weight M	Gas Constant $R=8314.36/M$ J/kg K	Specific heats C_p $C_v=C_p-R$ J/(kgK)		Isentropic index $\gamma = C_p/C_v$	R/C_p $= (\gamma-1)/\gamma$
air (dry)	28.966	287.04	1005	718.0	1.400	0.2856
water vapour	18.016	461.5	1884	1422	1.324	0.2450
nitrogen	28.015	296.8	1038	741.2	1.400	0.2859
oxygen	32.000	259.8	916.9	657.1	1.395	0.2833
carbon dioxide	44.003	188.9	849.9	661.0	1.286	0.2223
carbon monoxide	28.01	296.8	1043	746.2	1.398	0.2846
methane	16.04	518.4	2219	1700	1.305	0.2336
helium	4.003	2077	5236	3159	1.658	0.3967
hydrogen	2.016	4124	14361	10237	1.403	0.2872
argon	39.94	208.2	524.6	316.4	1.658	0.3968

Table 8.1. Thermodynamic properties of gases at atmospheric pressures and a temperature of 26.7°C.

پیوست ۹: رسانایی حرارتی و شیب زمین گرمایی سنگ‌ها (گروه ۱)

Rock type	Thermal conductivity W/(m°C)	Geothermal step m/°C
Copper orebody (Montana)	0.8 to 1.1	13 to 18
Copper orebody (Arizona)	1.3	22
Carboniferous	1.2 to 3.0	20 to 50
Clays	1.8	30
Limestone	3.3	55
Sandstone	2.0 to 3.6	30 to 60
Dolerite	2.0	33
Quartzite	4.0 to 7.0	65 to 120
Potash (low grade)	3.5 to 5.0	60 to 80
(high grade)	5.0 to 7.0	80 to 120
Halite (low grade)	1.5 to 4.0	25 to 70
(high grade)	4.0 to 6.0	70 to 100

Table 8.2. Typical values of thermal conductivity and geothermal step for a range of rock types.

For air and water in the range 0 to 60°C (Hemp, 1985)

$$k_a = 2.2438 \times 10^{-4} T^{0.8353} \quad \text{W/(m°C)}$$

$$k_w = 0.2083 + 1.335 \times 10^{-3} T \quad \text{W/(m°C)}$$

where T = Absolute temperature (K)

پیوست ۱۰: رسانایی حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه سنگ‌ها (گروه ۲)

Rock Type	Thermal conductivity	Specific Heat	Thermal Diffusivity
	W/mC	J/kgC	m ² /s 10 ⁻⁶
basalt	1.80	840	0.74
coal	0.33	1300	0.20
dunite	4.30	820	1.64
gabbro	2.10	800	0.97
gneiss	2.90	800	1.29
granite	3.00	790	1.41
limestone	1.30	840	0.64
magnetite	4.41	600	2.10
marble	2.60	880	1.18
potash	3.50	690	2.55
quartzite	5.25	800	2.43
quartzite	3.00	800	1.39
rock salt	4.48	880	2.04
sandstone	1.70	920	0.71
shale	1.23	850	0.55

Table ۱۰ Metric Examples of Airway Rock Physical Parameters

پیوست ۱۱: حداقل و حداکثر شیب زمین گرمایی سنگ‌ها

Orebody Type	Degrees C/100m		Degrees F/100ft	
	Min	Max	Min	Max
Copper Ore body	2.5	7.7	1.4	4.2
Carboniferous	2.0	5.0	1.1	2.7
Clays	3.3	3.3	1.8	1.8
Limestone	1.8	1.8	1.0	1.0
Sandstone	1.7	3.3	0.9	1.8
Dolerite	3.0	3.0	1.7	1.7
Quartzite	0.8	1.5	0.5	0.8
Potash Low Grade	1.3	1.7	0.7	0.9
Potash High Grade	0.8	1.3	0.5	0.7
Halite Low Grade	1.4	4.0	0.8	2.2
Halite High Grade	1.0	1.4	0.5	0.8

پیوست ۱۲: مشخصات ظرفیت گرمایی ویژه گازها

TABLE A-2

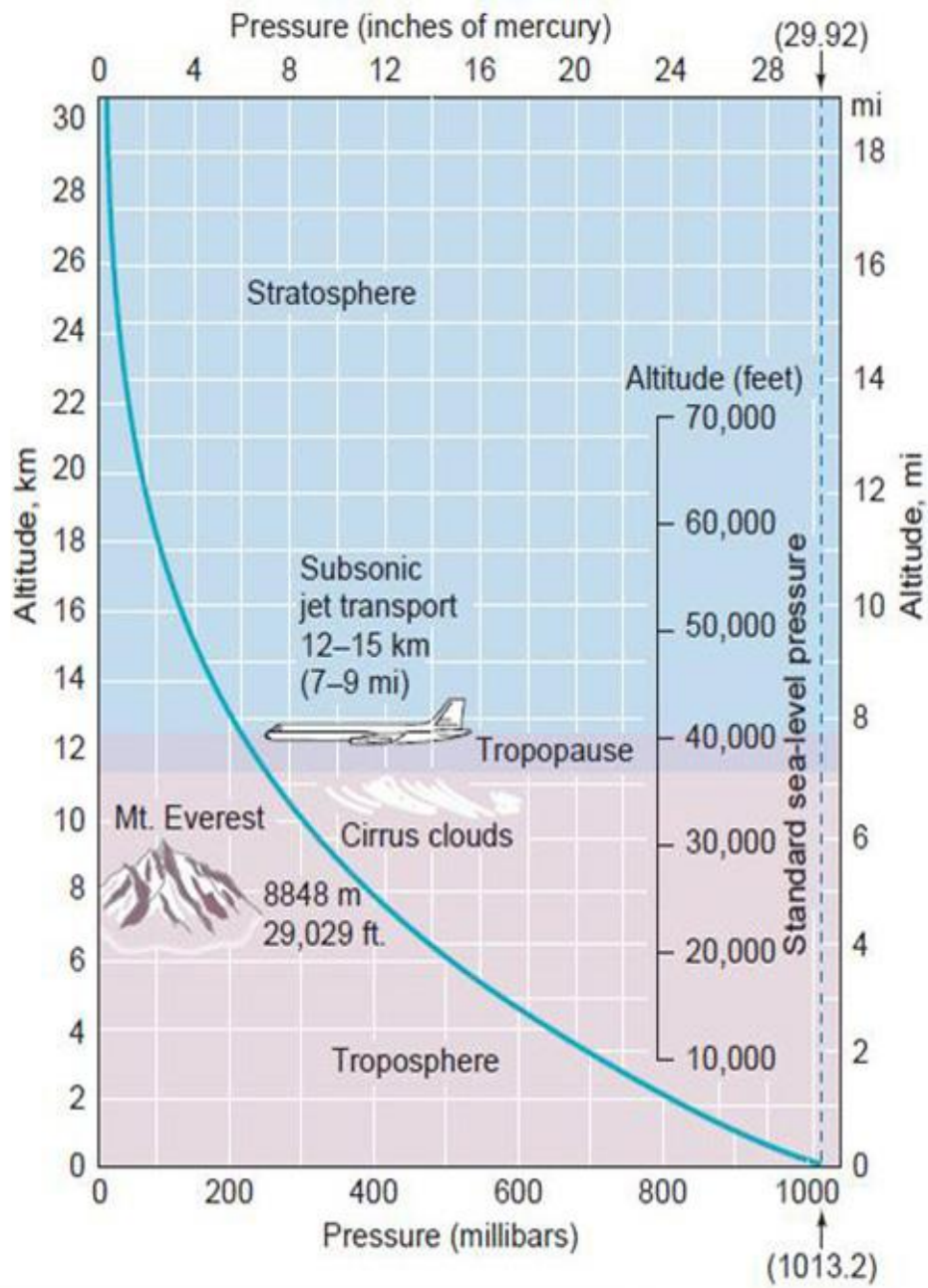
Ideal-gas specific heats of various common gases (Continued)

(b) At various temperatures

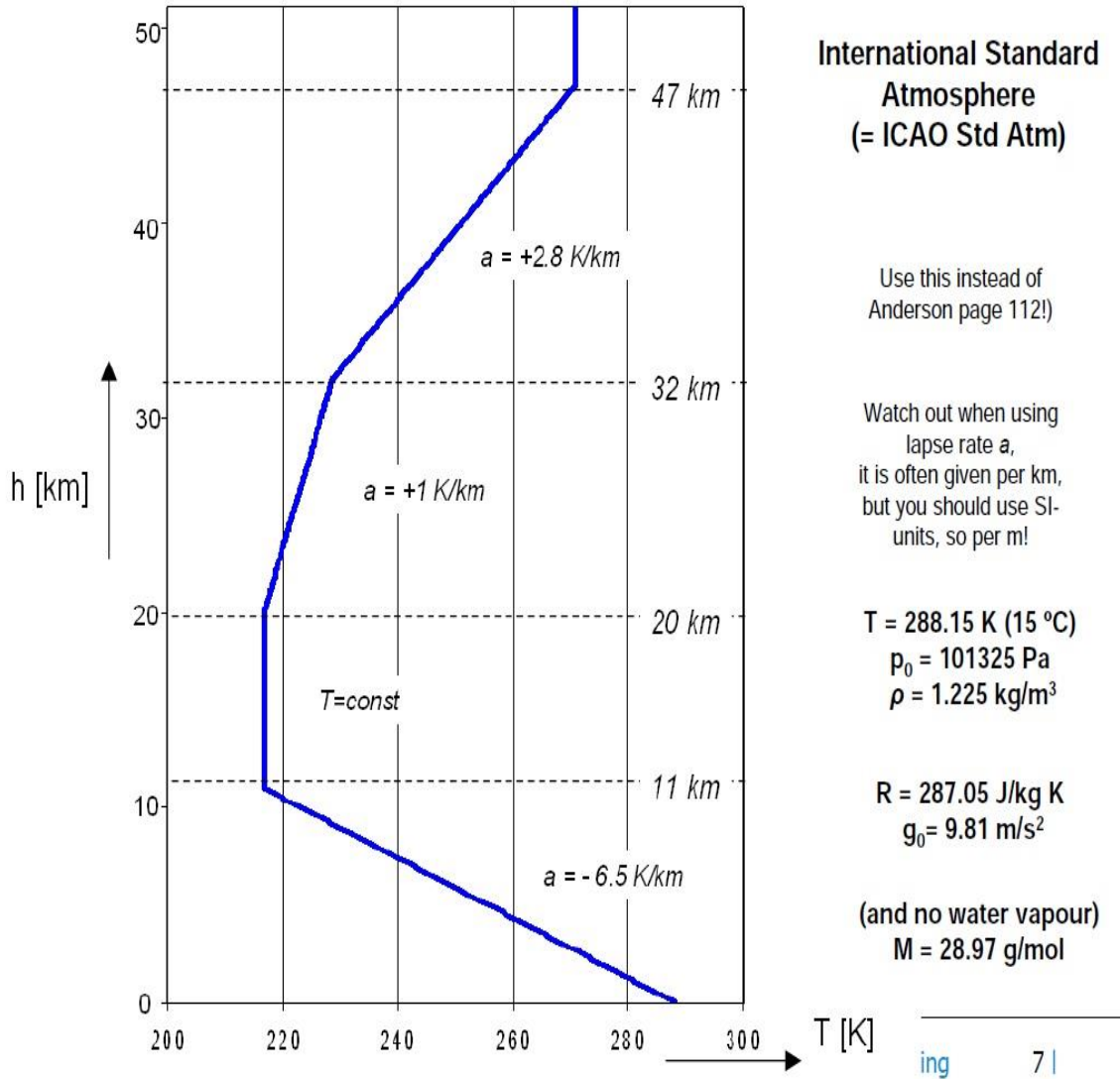
Temperature, K	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k
	Air			Carbon dioxide, CO ₂			Carbon monoxide, CO		
250	1.003	0.716	1.401	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400
300	1.005	0.718	1.400	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399
350	1.008	0.721	1.398	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398
400	1.013	0.726	1.395	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395
450	1.020	0.733	1.391	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392
500	1.029	0.742	1.387	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387
550	1.040	0.753	1.381	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376
650	1.063	0.776	1.370	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370
700	1.075	0.788	1.364	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364
750	1.087	0.800	1.359	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358
800	1.099	0.812	1.354	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353
900	1.121	0.834	1.344	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343
1000	1.142	0.855	1.336	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335
	Hydrogen, H ₂			Nitrogen, N ₂			Oxygen, O ₂		
250	14.051	9.927	1.416	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398
300	14.307	10.183	1.405	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395
350	14.427	10.302	1.400	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389
400	14.476	10.352	1.398	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382
450	14.501	10.377	1.398	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373
500	14.513	10.389	1.397	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365
550	14.530	10.405	1.396	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358
600	14.546	10.422	1.396	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350
650	14.571	10.447	1.395	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343
700	14.604	10.480	1.394	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337
750	14.645	10.521	1.392	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332
800	14.695	10.570	1.390	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327
900	14.822	10.698	1.385	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319
1000	14.983	10.859	1.380	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), p. 783, Table A-4M. Originally published in *Tables of Thermal Properties of Gases*, NBS Circular 564, 1955.

پیوست ۱۳: فشار اتمسفر در ارتفاعات مختلف



پیوست ۱۴: استاندارد جهانی اتمسفر



پیوست ۱۵: معادلات محاسبه فشار اتمسفر در ارتفاعات مختلف

Standard atmosphere for the [0km - 11km] range (troposphere)

NACA report 1235, eq.18:

$$\frac{P}{P_0} = \left[\frac{T_0 - a \times H}{T_0} \right]^n = \left[\frac{T}{T_0} \right]^n$$

derived from properties at sea level, with $n = 5.2561$, and where H is the altitude in meters :

$$P = 101325 \times (1 - 2.25569 \times 10^{-5} \times H)^{5.25616} \text{ [Pa]}$$

The temperature are varying linearly in the troposphere (NACA1235, eq.13):

$$T = T_0 - a \times H$$

where $a = 0.0065^\circ\text{C} \times \text{m}^{-1}$ is the *troposphere lapse rate*

Standard atmosphere for the [11km - 20km] range (stratosphere)

Once *Tropopause* (the boundary layer between the troposphere and the stratosphere) is passed, we reach the *stratosphere*.

NACA report 1235, eq.30:

$$\log \frac{P}{P_0} = n \times \log \left[\frac{T_0 - aH^*}{T_0} \right] - B(H - H^*)$$

$$P = 0.223356 \times 101325 * e^{-0.000157688 \times (H-11000)}$$

The temperatures in the stratosphere are considered constant and equal to Tropopause temperature T^* :

$$T = T^* = 216.66 \text{ K}$$

where T^* , P^* and H^* are respectively the Temperature, Pressure and Altitude for *Tropopause*.

پیوست ۱۶: مدل تحلیلی انتقال گرما در حفاریات معدنی

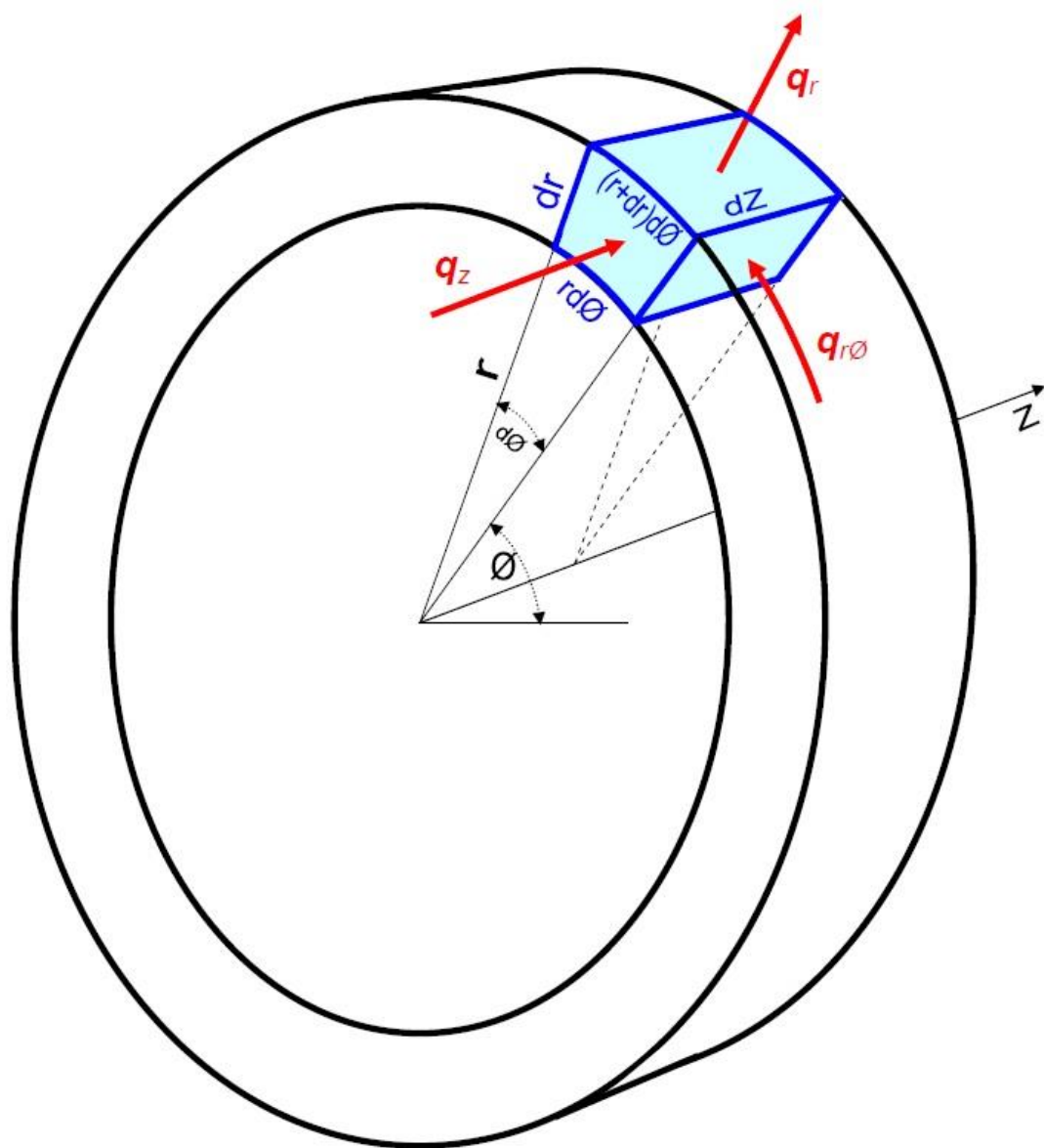


Figure Three dimensional heat flow.

پیوست ۱۷: معادلات انتقال گرما در حفاریات معدنی با سطوح خشک

Summary of procedure for calculating heat flux at dry surfaces

Before moving on to consider heat exchange at wet surfaces, it is convenient to summarize the procedure for calculating the emission of strata heat across a dry surface and to illustrate that procedure by a case study.

Calculation procedure for dry surface

1. Assemble the data:

- airway dimensions (m) .
- coefficient of friction, f (= Atkinson friction factor/0.6)
- age of airway, t (seconds) .
- airflow Q (m³/s) .
- mean dry bulb temperature of air, θ_d (°C)
wet bulb temperature, θ_w (°C)
barometric pressure, P (Pa) .
- rock thermal properties
thermal conductivity, k_r (W/m°C)
density, ρ_r (kg/m³)
specific heat, C_r (J/kg °C)
diffusivity, $\alpha_r = \frac{k_r}{\rho_r C_r}$ (m²/s)
virgin rock temperature, VRT (°C)

2. Determine derived parameters:

- cross sectional area, A (m²)
- perimeter of airway, per (m)
- hydraulic mean diameter, $d_h = 4A/per$ (m)
- effective radius, $r_a = per/(2\pi)$ (m)
- Reynolds' Number, Re . For the purposes of this procedure, Re may be calculated from the approximation $Re = 268\,000\,Q/per$
- moisture content of air, X (kg/kg dry air) (from Section 14.6)
- mean radiation path length, L (m)

3. Determine the Nusselt Number, N_u , either from Figure 15.5 or from equation (15.22): i.e.

$$N_u = \frac{0.35 f Re}{1 + 1.592 (15.217 f Re^{0.2} - 1) / Re^{0.125}}$$

4. Determine the overall heat transfer coefficient, h :

- (a) Convective heat transfer coefficient, h_c

$$h_c = 0.026 \frac{N_u}{d_h} \quad \text{W/(m}^2\text{°C)}$$

where $0.026 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$ = thermal conductivity of air

$$h_c = \frac{N_u k_a}{d} \quad \text{W/(m}^2\text{°C)}$$

where

k_a = thermal conductivity of air ($2.2348 \times 10^{-4} T^{0.8353} \text{ W/(m}^2\text{°C)}$), T being the absolute temperature in degrees Kelvin)

and d = hydraulic mean diameter (m)

ادامه پیوست ۱۷: معادلات انتقال گرما در حفاریات معدنی با سطوح خشک

(b) Effective radiative heat transfer coefficient, $a_b h_r$

$$h_r = 22.68 \times 10^{-8} (273.15 + \theta_d)^3 \quad \text{W/(m}^2\text{°C)}$$

$$\text{Absorption fraction } a_b = 0.104 \ln(147 \times L)$$

$$\text{Effective radiative heat transfer coefficient} = a_b h_r$$

(c) Overall heat transfer coefficient,

$$h = h_c + a_b h_r \quad (\text{W/m}^2\text{°C})$$

5 Calculate Biot Number, B :

$$B = \frac{h r_a}{k_r} \quad (\text{dimensionless})$$

6 Calculate Fourier Number, F_o :

$$F_o = \frac{\alpha_r t}{r_a^2} \quad (\text{dimensionless})$$

7 Determine dimensionless temperature gradient in the rock but at the surface, G , either from Figure 15.4 or from Gibson's algorithm (Appendix A15.2).

8 Determine heat flux, q :

$$q = h \frac{G}{B} (VRT - \theta_d) \quad (\text{W/m}^2)$$

9 Calculate heat emission into airway:

$$\frac{q \times \text{per} \times \text{length of airway}}{1000} \quad (\text{kW})$$

پیوست ۱۸: معادلات انتقال گرما در حفاریات معدنی با سطوح مرطوب

Heat transfer at wet surfaces

The majority of underground openings have some degree of water evaporation or condensation occurring on rock surfaces even if no liquid water is visible. The cooling effect of evaporation or the heating effect of condensation on the rock surface will then result in a reduction or increase, respectively, of the wall surface temperature. This, in turn, will modify the strata heat flow toward that surface.

Figure 15.6 shows the heat balance that must exist for thermal equilibrium at the rock/air interface.

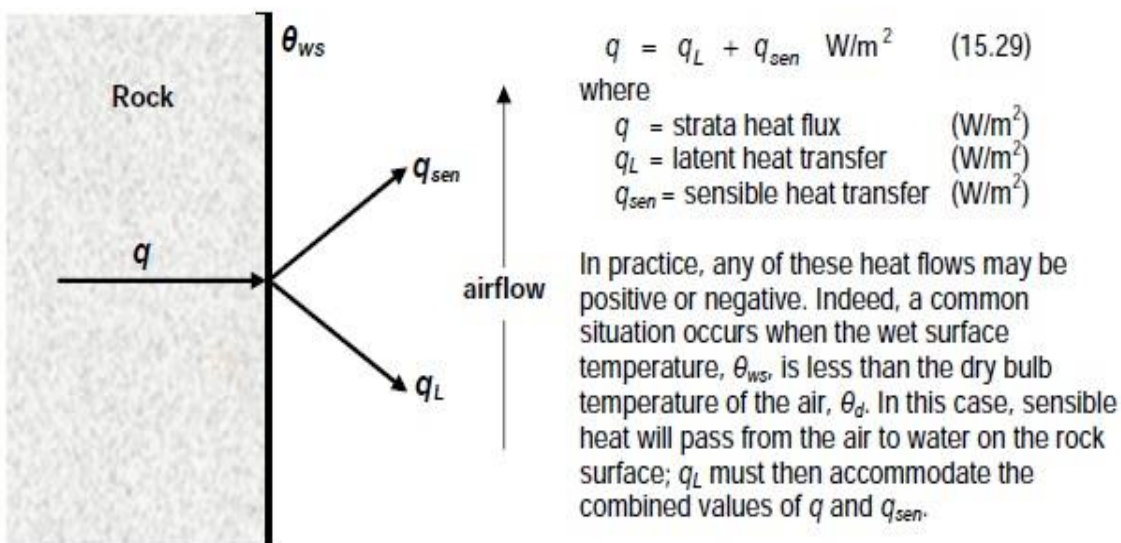


Figure 15.6 The heat balance at a wet surface.

In order to prevent unnecessary repetition, we shall assume evaporation in the following analysis. The same logic applies for condensation except that q_L is negative.

Much of the theory pertaining to heat transfer at dry surfaces applies, also, to wet surfaces. In particular, let us re-examine equation (15.21) which was derived for a dry surface.

$$q = h_c \frac{G}{B} (VRT - \theta_d) \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{ref (15.21)}$$

پیوست ۱۹: گراف برآورد عدد ناسلت

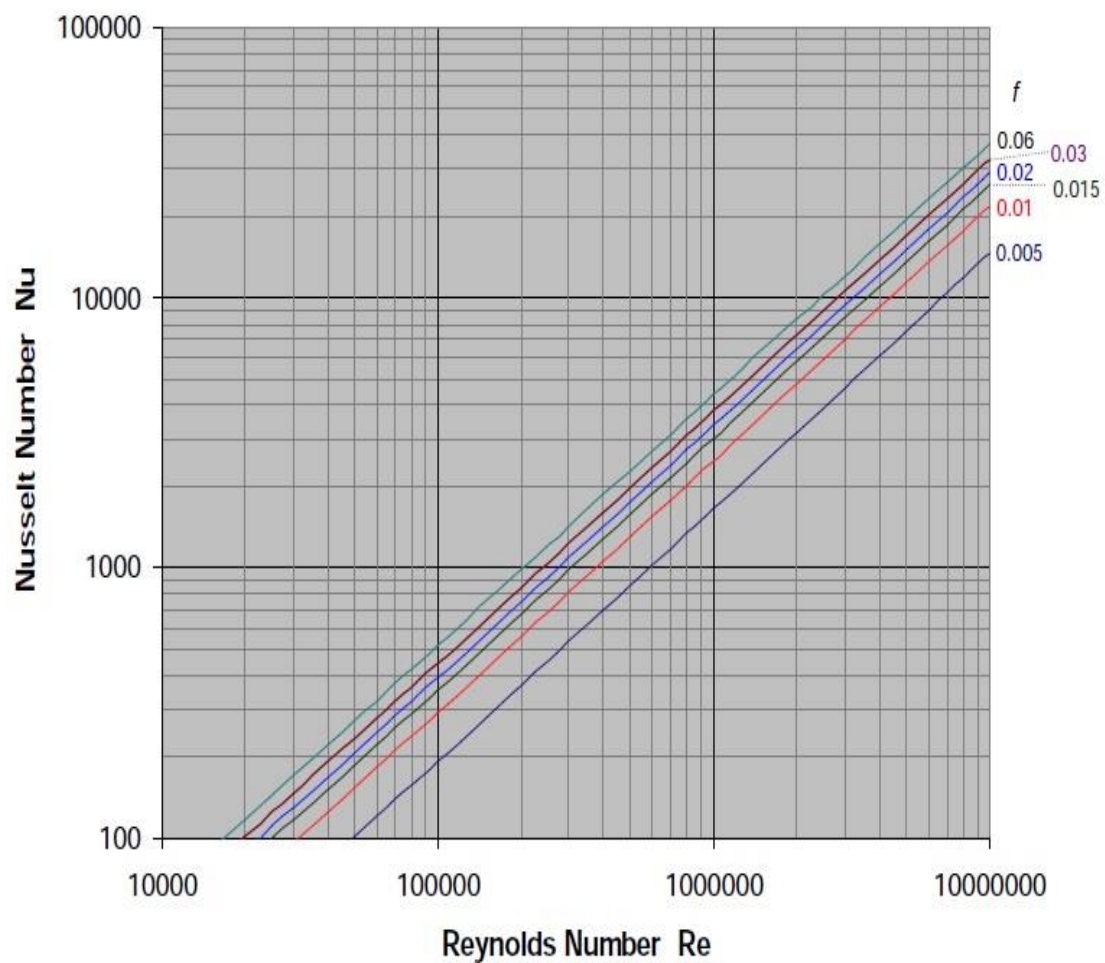


Figure Variation of Nusselt Number, Nu , with coefficient of friction, f , and Reynolds Number, Re . (Based on air at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

پیوست ۲۰: گراف برآورد ضریب جیپسون

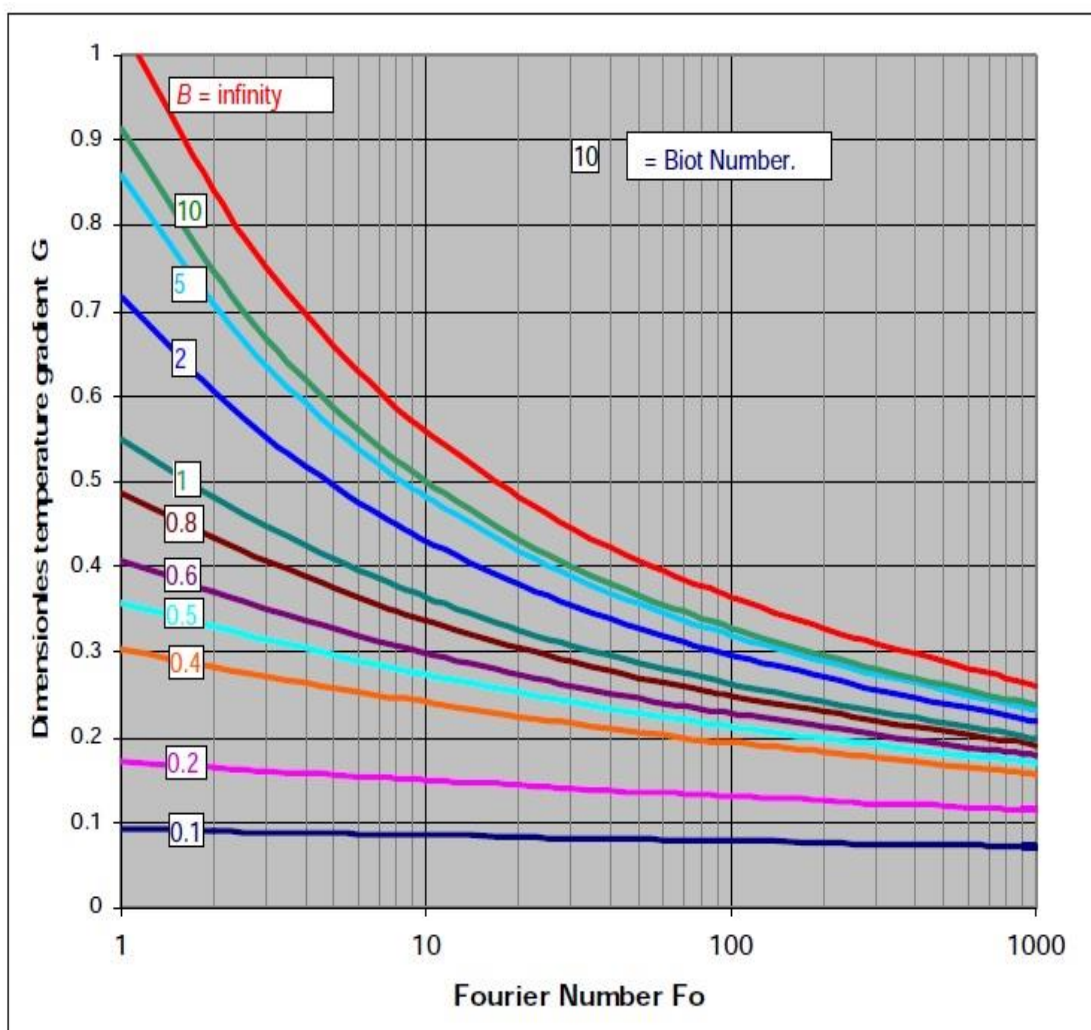


Figure These curves enable the dimensionless temperature gradient, G , in the rock at its surface to be estimated for known Fourier and Biot Numbers.

پیوست ۲۱: معادلات برآورد ضریب جیپسون

Gibson's algorithm for the numeric determination of dimensionless temperature gradient, G .

Enter α (rock diffusivity, m^2/s)
 t (age of airway, seconds)
 r_a (effective radius of airway = perimeter/(2π), metres)
 k (thermal conductivity of rock, $\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$).

Then

$$F = \alpha t / r_a^2 \text{ (Fourier Number)}$$

$$B = h r_a / k \text{ (Biot Number)}$$

$$x = \log_{10}(F)$$

$$y = \log_{10}(B)$$

$$c = x(0.000104x + 0.000997) - 0.001419$$

$$c = -\{x[x(xc - 0.046223) + 0.315553] + 0.006003\}$$

$$d = y - (x(4x - 34) - 5) / 120$$

$$d = 0.949 + 0.1 \exp(-2.69035 d^2)$$

$$m = \text{sqr} \left[(y - c)^2 + \frac{(216 + 5x)}{70} \left\{ 0.0725 + 0.01 \tan^{-1} \left(\frac{x}{0.7048} \right) \right\} \right]$$

$$n = (y + c - m) / 2$$

$$G = 10^n / d$$

پیوست ۲۲: مساله انتقال گرما در حفاریات معدنی

Case Study

This case study illustrates not only the calculation procedure but also typical magnitudes of the variables. The purpose of the exercise is to determine the strata heat that will flow into an incremental length of dry airway. The stages of calculation are numbered to coincide with the steps of the procedure given above.

1. Given data:

- airway dimensions
width = 3.5 m, height = 2.5 m, length = 20 m
- Atkinson friction factor (at $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$) = 0.014 kg/m^3
i.e. coefficient of friction, $f = 0.014/0.6 = 0.0233$ (dimensionless) .
- airway age = 3 months

$$t = \frac{365}{4} \times 24 \times 3600 = 7.884 \times 10^6 \text{ seconds}$$

- airflow, $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$.
- dry bulb temperature in airway, $\theta_d = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- from psychrometric data, the moisture content of the air has been determined to be $X = 0.01 \text{ kg/kg dry air}$.

- rock thermal properties:

conductivity, $k_r = 4.5 \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$

density, $\rho_r = 2200 \text{ kg/m}^3$

specific heat, $C_r = 950 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$

diffusivity, $\alpha_r = \frac{4.5}{2200 \times 950} = 2.153 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

virgin rock temperature, VRT = $42 \text{ }^\circ\text{C}$

Heat flux

$$q = h \frac{G}{B} (\text{VRT} - \theta_d) = 23.29 \times \frac{0.60}{9.885} (42 - 25) = 24 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

پیوست ۲۳: مساله انتقال گرما در تجهیزات الکتریکی

Example.

A 2000 m long conveyor transports 500 t/hr through a vertical lift of 200 m. If the conveyor motor consumes 1000 kW at a combined motor/transmission efficiency of 90%, calculate the heat emitted

- (1) at the gearhead and
- (2) along the length of the conveyor.

Solution.

Work done against gravity = mass flow $\times$ g $\times$ vertical lift

$$= \frac{500 \times 1000}{60 \times 60} \times 9.81 \times 200 = 272.5 \times 10^3 \text{ W or } 272.5 \text{ kW}$$
$$\frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{m}$$

- 1 . Heat generated at gearhead = (100 - 90)% of 1000 kW = 100 kW
- 2 . Heat generated along length of conveyor = 1000 - 272.5 - 100 = 627.5 kW

پیوست ۲۴: مساله انتقال گرما در تجهیزات دیزلی

Example.

Two load-haul-dump vehicles consume 600 litres of diesel fuel in an 8 hour shift. Tests have shown that water vapour is produced at a rate of 5 litres (liquid equivalent) per litre of fuel. If the combustion efficiency is 95 per cent and the total calorific value of the fuel is 34 000 kJ/litre, calculate the sensible and latent heat loads on the stope ventilation system.

Solution.

Total amount of heat produced from burning 600 $\times$ 0.95 litres of fuel

$$\begin{aligned} &= 600 \times 0.95 \times 34\,000 \\ &= 19.38 \times 10^6 \text{ kJ in 8 hours} \\ &= \frac{19.38 \times 10^6}{8 \times 60 \times 60} = 673 \text{ kW} \end{aligned}$$

(This is equivalent to the continuous running of diesel machinery of rated output = 673/2.83 = 238 kW)

پیوست ۲۵: مساله انتقال گرما در ایستگاه منبع آب

Example.

A mine produces 5 million litres of water per day, emitted at an average temperature of 42 °C. When the water is delivered into the shaft sump for pumping to the surface, the water temperature is 32 °C. Determine the heat load from the water on the mine ventilation system.

Solution.

$$\begin{aligned} \text{Heat load} &= \text{Mass flow} \times \text{specific heat} \times \text{drop in temperature} \\ &= \frac{5\,000\,000}{24 \times 60 \times 60} \times \frac{4187}{1000} \times (42 - 32) = 2\,423 \text{ kW} \\ &\quad \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \quad ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

پیوست ۲۶: مساله انتقال گرما از آب درون مجاری باز

Example.

Water flows at a rate of 60 litres per second along an open drainage channel that is 0.5 m wide and 0.25 m deep. The channel is located in an airway of cross-sectional area 12 m² and perimeter 14 m, and which passes an airflow of 50 m³/s. Over a 10 m length of channel, the following mean values are given:

water temperature, θ_{ws}	=	32 °C
air dry bulb temperature, θ_d	=	30 °C
air wet bulb temperature, θ_w	=	25 °C
barometric pressure, P	=	112 kPa

The total heat gained by the air from the water is the sum of the sensible and latent heat transfers,

$$q = 2.378 + 0.161 = 2.539 \text{ kW.}$$

پیوست ۲۷: مساله انتقال گرما از اکسایش مواد معدنی

Example.

10 m³/s of air enters a working district in a coal mine at an oxygen content of 21% by volume, and leaves at 20.8%. Calculate the heat generated by oxidation assuming complete combustion.

Solution.

The equivalent volume flow of oxygen at entry = $0.21 \times 10 = 2.1 \text{ m}^3/\text{s}$

The equivalent volume flow of oxygen at exit = $0.208 \times 10 = 2.08 \text{ m}^3/\text{s}$

Taking the density of oxygen to be 1.3 kg/m³ gives the oxygen depletion rate to be

$$(2.1 - 2.08) \times 1.3 = 0.026 \text{ kg/s}$$

$$\text{Heat produced} = 0.026 \times 12\,675 = 330 \text{ kW}$$

پیوست ۲۸: مساله انتقال گرما از انفجار مواد منفجره

Example.

In a 2000 tonne blast, the charge density of ANFO is 0.8 kg/t. It is estimated that 20% of the blast heat will be removed within 1 h with the blasting fumes.

- (1) Calculate the mean value of the rate of heat removed by the airflow during this hour.
- (2) If the specific heat of the rock is 950 J/kg °C determine the average increase in temperature of the rock due to blasting.

Solution:

$$1. \text{ Mass of explosive used} = 2000 \times 0.8 = 1\,600 \text{ kg ANFO}$$

$$\text{Heat produced by ANFO} = 3700 \times 1600 = 5\,920\,000 \text{ kJ}$$

Twenty per cent of this heat is removed in the blasting fumes over 1 hour.

Average rate of heat removal with blasting fumes

$$= \frac{5\,920\,000}{3600} \times 0.2 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 329 \text{ kW}$$

پیوست ۲۹: مساله انتقال گرما از حمل و نقل سنگ‌های خرد شده

Example.

Fragmented ore of specific heat $900 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$ enters the top of an ore pass at a temperature of 35°C and at a rate of 500 tonnes per hour. At an elevation 200 m below, the ore is discharged onto a conveyor and reaches the shaft bottom at a temperature of 32°C . Calculate the heat transferred from the broken ore to the ventilation system over the length of the conveyor.

Solution.

From equation (15.54), temperature rise of the rock in the ore pass

$$= \frac{200 \times 9.81}{900} = 2.18^\circ\text{C} \quad (\text{assuming no heat transfer between the fragmented ore and the surrounding strata})$$

Temperature of rock at bottom of ore pass = $35 + 2.18 = 37.18^\circ\text{C}$

$$\text{Mass flow of ore, } m = \frac{500 \times 1000}{3600} = 138.9 \text{ kg/s}$$

Heat transfer to the airflow from ore on the conveyor (see equation (15.56))

$$mC(\theta_1 - \theta_2) = 138.9 \times 0.900 \times (37.18 - 32) = 647 \text{ kW}$$

پیوست ۳۰: مساله انتقال گرما از پرسنل

به عنوان مثال، اگر در یک معدن ۶۰۰ نفر در آن واحد مشغول به کار باشند و شدت کار آنها متوسط باشد (۲۷۵ وات)، در آن صورت توان گرمایی که به وسیله افراد به سیستم تهویه معدن تحمیل می‌شود ۱۶۵ کیلووات خواهد بود.

پیوست ۳۱: مساله تحلیل مدل هوای خشک

هوا از درون یک تونل افقی با مقطع دایره به قطر ۶ متر و به طول ۳۰۰۰ متر در جریان است. در ورود هوا به تونل، سرعت ۱۰ متر در ثانیه، فشار ۱۰۱/۳۲۵ کیلوپاسکال و دما ۱۰ درجه سانتیگراد است. شدت جریان گرما از سنگها به سوی هوا، ۵ کیلوژول بر کیلوگرم و ضریب اصطکاک دیواره تونل $f = 40 \times 10^{-3}$ است.

$$P_r = 96/147 \text{ KPa}$$

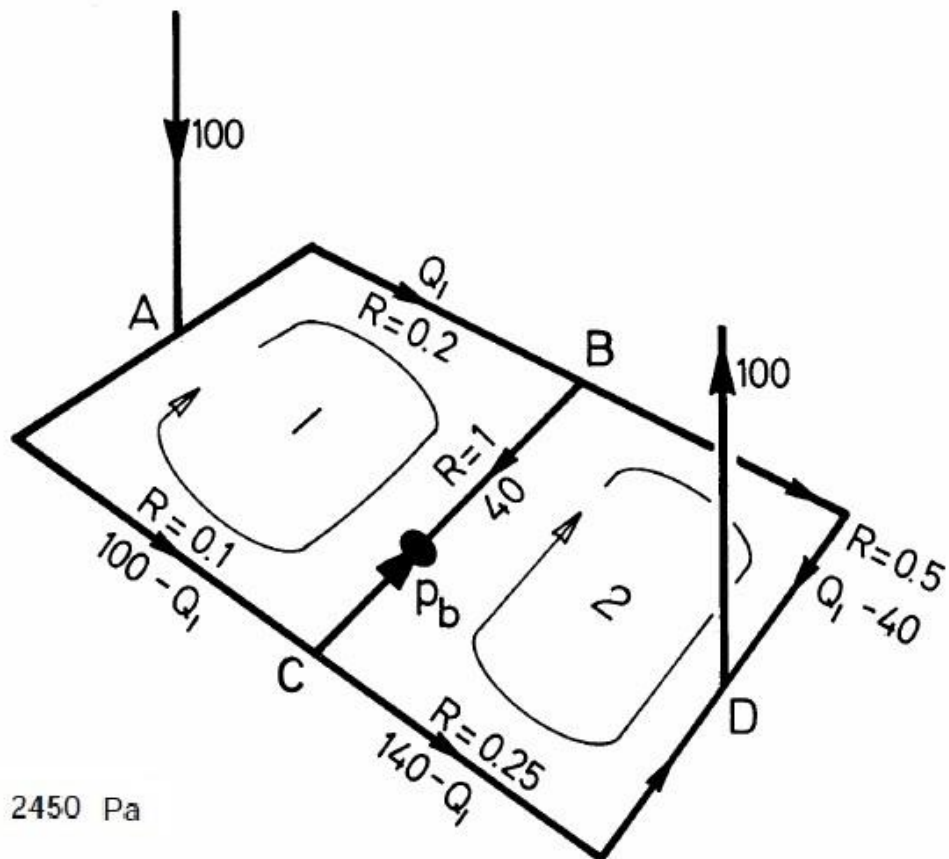
در این صورت مشخصات هوای خروجی و ابیاید

$$T_r = 288/12 \text{ K}$$

$$\nu_r = 0/86004 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$\rho_r = 1/16273 \text{ kg/m}^3$$

پیوست ۳۲: تحلیل شبکه تهویه به روش دستی



$$p_b = 2450 \text{ Pa}$$

Figure Example network showing two meshes and Kirchhoff I applied at each junction.

The only practical solution is $Q_1 = 68.83 \text{ m}^3/\text{s}$. The flows in all branches are then given from inspection of Figure

AB	68.83 m ³ /s
BD	28.83
BC	40.00
AC	31.17
CD	71.17

پیوست ۳۳: مساله تحلیل مدل هوای مرطوب

از درون چاهی به عمق ۳۰۰۰ متر هوا به سمت پایین در حرکت است. مشخصات هوا در بالای چاه به شرح زیر است:

فشار: ۱۰۱/۳۲۵ کیلوپاسکال

دما: ۱۰ درجه سانتیگراد

نسبت رطوبت: ۰/۰۰۴

آهنگ تبادل حرارت از دیواره چاه به سمت هوا ۵/۰۸۷ کیلوژول بر کیلوگرم و میزان تبخیر ۰/۰۰۴ کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوای خشک است. اگر حرکت هوا بدون اصطکاک فرض شود، مشخصات هوا در کف چاه را محاسبه کنید.

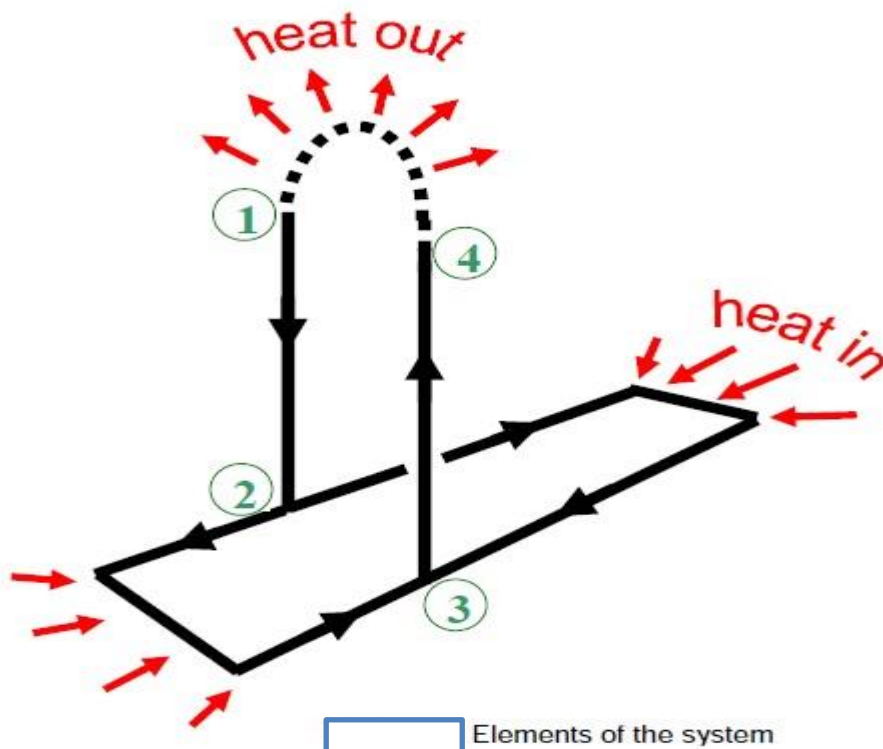
$$\nu_{a2} = 0.62452 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_{a2} = 141.386 \text{ kPa}$$

$$P_{v2} = 1.819 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 143.205 \text{ kPa}$$

پیوست ۳۴: سیکل ترمودینامیکی در تهویه معادن



Abstract

Ventilation design is essential for underground excavations such as mines. There are several perspectives for designing of mines ventilation based on fluids analysis and design method. Ventilation design based on fluids analysis is analyzed in two models of incompressibility and compressibility. Also based on design method has been presented two methods manual and computerize.

Air is considered as the main fluid in ventilation design of mines. The important characteristics of this fluid are temperature and its density. Based on this, air fluid could be analyzed in two models of incompressibility and compressibility. In the incompressibility model, the values of air temperature and its density remain constant in length of excavation. But in the compressibility model, these values are variable.

One of the methods of mine ventilation design in incompressibility model is computerize method. The computerize method is based on approximate mathematical methods. A number of approximate mathematical methods include Hardy Cross method, Wang model of Hardy Cross, spatial model of Hardy Cross, conflation model of Hardy Cross, Newtonian models of Hardy Cross, Wang model of Newton- Raphson and Newton- Raphson with variable directions. Faster convergence to the final answer is one of the main purposes of the above methods. Accordingly, in this research, the above methods are investigated in different models of ventilation networks based on faster convergence to the final answer and the results show that the conflation model of the Hardy Cross and the Newton-Raphson with variable directions are more reliable. Therefore, in this research, for converge faster to the final answer based on conflation model of Hardy Cross method is presented a new method as the second conflation Hardy Cross method. Also, in this research, for easier using of the Newton-Raphson method with variable directions is presented a new method as the Newton-Raphson method without derivative. Also, this research shows that Newtonian's methods have weaknesses for ventilation networks with ventilators that their pressure is certain. Based on this, three modified Newtonian methods are presented in this research.

For designing ventilation of mines in compressibility model is analyzed air fluid in two models of dry and wet. Due to changes in temperature and density of air in length of excavation, the expressed equations in compressibility model are related to the interpretation of the outlet air characteristics such as temperature, specific gravity, velocity, pressure and humidity in per length of excavation. For interpreting of the dry air model should be solved a nonlinear equation. Based on mathematical science is easily calculated its final answer. But For interpreting of the wet air model should be solved two nonlinear equations. For solving these equations are proposed approximate mathematical methods. Accordingly, in this research is presented three new methods for easier interpreting of compressible model. Their names are delta method, K method and K-W method. In delta and K methods are assumed vaporization rate of water vapor is certain. But in K-W method is assumed vaporization rate is uncertain.

Also, in this research for reducing errors and increase the accuracy of calculations in mine ventilation design in two models of incompressibility and compressibility is presented a computer program under Windows with name's "Ventilation Design" in environment of Visual C++ 6.

Keywords

Ventilation, Incompressible, Compressible, Hardy Cross, Newton-Raphson



Shahrood University of Thechnology
Faculy of mining, Petroluem and Geophysics Engineering

PhD Thesis in Mineral Exploitation

Presentation a Mathematical Model for Ventilation Network Analysis of Mines

By:

Ebrahim Elahi Zeyni

Supervsiors:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. Reza Kakaie

October 2020