



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

## طراحی سیستم تهویه خط ۲ مترو مشهد با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی

نگارنده: حسین رفاهی

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر علی عباس نژاد

مشاور

مهندس احسان دباغ نیشابوری

تیر ۱۳۹۶



تقدیرم به:

پدرم به استوار رکوه که سفت‌ها زندگی را به دوش کشید تا من بتوانم  
به این مرحله از زندگی ام برسم.

مادرم به زلال چشمه که همواره دعاها را در آنه اش ریختواند اگر گرم در  
مسیر زندگی ام است.

و همسرم به صمیمیت باران.



## تقدیر و تشکر

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. برحسب وظیفه از زحمات اساتید گران قدرم آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر علی عباس نژاد که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را به عهده داشتند صمیمانه سپاس گذارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

همچنین از زحمات استاد مشاور خود مهندس احسان دباغ نیشابوری (مدیر پروژه تهیه قطار شهری مشهد) به خاطر همکاری بی دریغشان در این عرصه صمیمانه سپاس گذارم. و جا دارد تشکر کنم از جناب آقای حامد شیردل مدیریت حراست قطار شهری مشهد، مهندس شهریار بهرامی اقدامی کارشناس انرژی قطار شهری مشهد و همچنین جناب آقای اسماعیل پیرزهان مسئول مرکز اسناد و کتابخانه شرکت بهره برداری قطار شهری مشهد. سپاس آخر را از مهربان ترین همراهان زندگی ام، پدر و مادرم دارم که حضورشان در فضای زندگی ام مصداق بی ریای سخاوت بوده است.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید

# تعهد نامه

این جانب **حسین رفاهی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی معدن** دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی سیستم تهویه خط ۲ مترو مشهد با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی تحت راهنمایی **دکتر فرهنگ سرشکی** و **دکتر علی عباس نژاد** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## چکیده

نیاز به سیستم حمل و نقل عمومی با کیفیت، نیاز اساسی شهرهای پرجمعیت است. مترو به دلیل سهولت استفاده و صرف وقت و هزینه کمتر نسبت به دیگر وسایل حمل و نقل عمومی از محبوبیت بیشتری برخوردار است بنابراین به دلیل این که افرادی زیادی از آن استفاده می کنند باید در طراحی سیستم تهویه آن دقت کافی را داشته باشیم. سیستم تهویه مترو در زمان بهره برداری اهمیت بیشتری نسبت به زمان حفاری دارد و باید به گونه ای طراحی شود که شرایط آسایش حرارتی را برای مسافران و کارکنان فراهم کند. استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی کمک می کند تا مقدار هوای لازم و در نهایت تعداد فن های مورد نیاز جهت تهویه را برای محیط مورد نظر به دست آوریم. در این پایان نامه با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی و مطالعه پارامتری تعداد فن های مورد نیاز و مشخصات آن ها تعیین شده است. این مدل سازی به صورت حجم محدود انجام شده و در این مدل سازی از مدل اغتشاش  $k - \epsilon$  استاندارد استفاده شد. مدل سازی و حل مسئله با استفاده از نرم افزار ANSYS Workbench انجام شد. برای بررسی سرعت و دمای هوا و مقایسه آن با مدل CFD ساخته شده از دستگاه سرعت سنج و دماسنج استفاده شد. با توجه به این که فاز یک مترو مشهد شامل شش ایستگاه مشابه است تنها یک مدل از ایستگاه ساخته شد و نتایج را به تمام ایستگاه ها تعمیم داده شد. نتایج مدل CFD نشان داد که برای تهویه ایستگاه به دو فن اصلی با دبی حجمی  $125 \text{ m}^3/\text{s}$  در ابتدا و انتهای ایستگاه و یک فن با دبی حجمی  $23 \text{ m}^3/\text{s}$  در تراز کنترل بلیت نیاز است. تأثیر دستگاه ابرواشر بر سیستم تهویه و لزوم استفاده از آن در فصل تابستان با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شد و در نهایت با توجه به شرایط آب و هوایی شهر مشهد استراتژی های لازم جهت استفاده بهینه از سیستم تهویه در مترو ارائه شد. نتایج نشان داد که در دمای بالای  $21^\circ\text{C}$  نیاز به دستگاه هواشوی داریم و در دمای  $15^\circ\text{C}$  تا  $21^\circ\text{C}$  نیاز به دستگاه هواشوی نیست. برای دماهای  $11^\circ\text{C}$  تا  $17^\circ\text{C}$  نیاز به استفاده از فن تراز کنترل بلیت نداریم و در دماهای کمتر از  $10^\circ\text{C}$  در برخی قسمت ها نیاز وسایل گرمایشی احساس می شود.

کلمات کلیدی: سیستم تهویه، دینامیک سیالات محاسباتی، مترو، مدل CFD، فن، ابرواشر

## مقالات استخراج شده از پایان نامه

۱. طراحی سیستم تهویه خط ۲ مترو مشهد (فاز یک) با استفاده از مدل CFD
۲. بررسی لزوم یا عدم لزوم استفاده از دستگاه ابرواشر در سیستم تهویه خط ۲ مترو مشهد برای دو حالت فصل تابستان و زمستان با استفاده از مدل سازی CFD
۳. انتخاب بهترین استراتژی برای عملکرد بهینه سیستم تهویه خط ۲ مترو مشهد با استفاده از مدل

CFD

# فهرست

فصل اول: کلیات طرح تحقیق .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۲
۲-۱- بیان مسئله .....	۲
۳-۱- اهمیت تحقیق .....	۴
۴-۱- ضرورت تحقیق .....	۴
۵-۱- هدف تحقیق .....	۵
۶-۱- معرفی مترو مشهد .....	۶
۷-۱- فرضیات تحقیق .....	۷
۸-۱- ساختار پایان نامه .....	۷
فصل دوم: مبانی نظری و پیشینه تحقیق .....	۹
۱-۲- مقدمه .....	۱۰
۲-۲- دلایل نیاز به سیستم تهویه در مترو .....	۱۰
۳-۲- بار حرارتی تولیدی در ایستگاهها و تونل‌های مترو .....	۱۱
۴-۲- انواع سیستم‌های تهویه تونل‌ها و ایستگاهها .....	۱۲
۱-۴-۲- تهویه طبیعی و تهویه ناشی از اثر پیستونی .....	۱۳
۲-۴-۲- تهویه طولی .....	۱۳
۳-۴-۲- تهویه عرضی .....	۱۶
۴-۴-۲- تهویه نیمه عرضی .....	۱۶
۵-۲- بررسی سیستم‌های متداول تهویه در مترو .....	۱۷

۱۸	۶-۲- دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD
۲۰	۷-۲- مروری بر کارهای مشابه گذشته
۳۰	۹-۲- جمع‌بندی
۳۱	فصل سوم: تهویه مطبوع در مترو
۳۲	۱-۳- مقدمه
۳۳	۲-۳- تهویه مطبوع
۳۴	۳-۳- وظایف و اهداف سیستم تهویه مطبوع
۳۵	۴-۳- هوا و آسایش انسان
۳۷	۵-۳- اجزای تهویه مترو
۳۸	۱-۵-۳- بادبزن‌های محوری
۳۹	۲-۵-۳- ایرواشر
۴۰	۳-۵-۳- صدا خفه کن
۴۰	۴-۵-۳- فیلتر هوا
۴۱	۶-۳- بار حرارتی مترو
۴۲	۱-۶-۳- بارهای حرارتی ثابت در مترو
۴۴	۲-۶-۳- بار حرارتی حاصل از حرکت دینامیکی قطار
۴۵	۷-۳- مراحل طراحی سیستم تهویه مطبوع
۴۵	۱-۷-۳- ظرفیت سیستم تهویه مطبوع
۴۶	۲-۷-۳- بار حرارتی ساختمان
۴۶	۳-۷-۳- روز طرح
۴۶	۸-۳- تهویه اضطراری
۴۸	۱-۸-۳- اهداف تهویه اضطراری
۴۸	۲-۸-۳- قابلیت معکوس شدن سیستم تهویه
۴۹	۹-۳- جمع‌بندی

۵۱	فصل چهارم: دینامیک سیالات محاسباتی و کاربرد آن در تهویه
۵۲	۴-۱- مقدمه
۵۳	۴-۲- مدل‌های جریان
۵۵	۴-۳- معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت
۵۶	۴-۳-۱- معادله بقای جرم
۵۸	۴-۳-۲- معادلات حرکت
۶۱	۴-۳-۳- معادله انرژی
۶۵	۴-۴- جریان سیال و آشفتگی
۶۶	۴-۵- آشفتگی چیست؟
۶۸	۴-۶- مدل‌سازی جریان‌های آشفته
۶۹	۴-۷- مروری بر روش‌های RANS
۷۱	۴-۸- مدل استاندارد $k - \epsilon$
۷۳	۴-۹- تعیین نواحی سلول و شرایط مرزی
۷۴	۴-۹-۱- نواحی سلولی سیال
۷۴	۴-۹-۲- نواحی سلولی جامد
۷۴	۴-۹-۳- شرایط مرزی
۷۷	۴-۱۰- روش‌های حل مسئله (اصول حل گری)
۷۸	۴-۱۰-۱- روش‌های درونیابی برای پارامتر جابجایی
۷۹	۴-۱۱-۲- روش‌های درونیابی برای گرادیان‌ها
۸۰	۴-۱۰-۳- روش‌های درونیابی برای فشار
۸۱	۴-۱۰-۴- کوپلینگ فشار-سرعت
۸۲	۴-۱۱- همگرایی
۸۳	۴-۱۲- تولید شبکه (Mesh)
۸۳	۴-۱۲-۱- خواص شبکه

۸۴	۴-۱۲-۲- شبکه‌بندی با استفاده از کامپیوتر
۸۵	۴-۱۲-۳- کیفیت شبکه
۸۹	۴-۱۳- جمع‌بندی
۹۱	فصل پنجم: طراحی سیستم تهویه مترو با استفاده از مدلسازی CFD
۹۲	۵-۱- مقدمه
۹۳	۵-۲- ساخت هندسه مدل
۹۶	۵-۳- شبکه‌بندی
۹۹	۵-۴- استقلال از شبکه
۱۰۴	۵-۵- فیزیک مسئله
۱۰۷	۵-۶- حل مسئله
۱۰۸	۵-۷- گزارش‌ها و پردازش‌ها
۱۰۸	۵-۷-۱- تعیین مشخصات فن‌های تهویه
۱۱۳	۵-۷-۲- طراحی سیستم تهویه با توجه به تغییرات دمایی شهر مشهد
۱۱۶	۵-۷-۳- انتخاب استراتژی‌های مناسب برای سیستم تهویه
۱۲۵	۵-۸- اعتبار سنجی
۱۲۶	۵-۸-۱- اعتبار سنجی با استفاده از طرح اجرایی
۱۲۷	۵-۸-۲- اعتبار سنجی با استفاده از اندازه‌گیری سرعت و دمای هوا
۱۳۲	۵-۹- جمع‌بندی
۱۳۳	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۳۴	۶-۱- نتیجه‌گیری
۱۳۵	۶-۲- پیشنهادها
۱۳۵	منابع



# فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: خطوط مترو طراحی شده برای شهر مشهد..... ۶
- شکل ۱-۲: نتایج میزان گرمای تولیدی در مترو..... ۱۲
- شکل ۲-۲: تونل گوتاردبیز در سوئیس..... ۱۵
- شکل ۳-۲: تونل لوتزبرگ در سوئیس به طول ۲۰ کیلومتر مشابه با تونل بلارگ..... ۱۵
- شکل ۴-۲: سیستم تهویه کاملاً عرضی..... ۱۶
- شکل ۵-۲: سیستم تهویه نیمه عرضی..... ۱۷
- شکل ۶-۲: موقعیت شفت‌ها و تأثیر جت فن در تقسیم هوای ورودی از شفت..... ۱۸
- شکل ۱-۳: بادبزن محوری..... ۳۹
- شکل ۲-۳: انواع نصب فیلتر..... ۴۰
- شکل ۳-۳: نحوه عملکرد وسایل الکتریکی..... ۴۴
- شکل ۱-۴: مدل حجم محدود (الف) حجم کنترل محدود متحرک، (ب) حجم کنترل محدود ثابت شده..... ۵۴
- شکل ۲-۴: جریان‌های جرمی ورودی و خروجی از المان سیال..... ۵۶
- شکل ۳-۴: دیاگرام قانون دوم نیوتون دینامیک سیالات..... ۵۸
- شکل ۴-۴: المان مربوط به سیال که تنها مؤلفه‌های تنش در جهت X آن مشخص شده است..... ۵۹
- شکل ۵-۴: جریان‌های انرژی مربوط به المان سیال، تنها جریان‌های مربوط به جهت X نشان داده شده است..... ۶۲
- شکل ۶-۴: لایه مرزی تشکیل شده جریان روی یک صفحه تخت..... ۶۵
- شکل ۷-۴: اندازه‌گیری سرعت در یک نقطه در جریان آشفته..... ۶۷
- شکل ۸-۴: مدل‌های آشفتگی موجود در ANSYS FLUENT..... ۷۰
- شکل ۹-۴: انواع شبکه در حالت دوبعدی و سه‌بعدی..... ۸۵

- شکل ۴-۱۰: نمایش بردارها و سلول در محاسبه کیفیت تعامد..... ۸۶
- شکل ۴-۱۱: توصیف سلول واقعی و سلول بهینه..... ۸۷
- شکل ۵-۱: مراحل انجام پروژه..... ۹۳
- شکل ۵-۲: نقشه سه بعدی مربوط به ایستگاه..... ۹۴
- شکل ۵-۳: مدل هندسه ایستگاه..... ۹۵
- شکل ۵-۴: مدل هندسه اتاق برق و کنترل..... ۹۵
- شکل ۵-۵: نحوه شبکه بندی شدن هندسه ایستگاه..... ۹۷
- شکل ۵-۶: نمودار توزیع کیفی المان‌ها در شبکه بندی مدل اصلی بر اساس کیفیت تعامد..... ۹۸
- شکل ۵-۷: نمودار توزیع کیفی المان‌ها در شبکه بندی مدل اصلی بر اساس معیار کشیدگی..... ۹۸
- شکل ۵-۸: نحوه شبکه بندی اتاق تأسیسات..... ۹۹
- شکل ۵-۹: نمودار انتخاب بهترین سائز المان در شبکه بندی اصلی..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۰: شبکه‌های ایجاد شده برای بررسی استقلال از شبکه (الف) شبکه اصلی، (ب) شبکه درشت‌تر، (ج) شبکه ریزتر و (د) شبکه متورم..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۱: نمودار همگرایی باقیمانده‌ها (الف) شبکه بندی اصلی، (ب) شبکه بندی بزرگتر، (ج) شبکه بندی کوچکتر و (د) شبکه بندی متورم..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۲: شماتیک دوپل هوا رسانی..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۳: نمودار همگرایی باقی مانده‌ها برای حل اولیه..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۴: نمودار موازنه جرم ورودی و خروجی هوا در مدل..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۵: پلان مربوط به مطالعه پارامتری قسمت‌های عمومی که بر اساس سرعت هوا رنگبندی شده است..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۶: خطوط جریان مربوط به فن اصلی با دبی حجمی  $125/2 \text{ m}^3/\text{s}$  و فن ایستگاه با دبی حجمی  $22/5 \text{ m}^3/\text{s}$ ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۷: وضعیت دمایی مترو در فصل تابستان..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۸: وضعیت دمایی مترو در فصل زمستان..... ۱۱۶

- شکل ۵-۱۹: دمای هوای داخل مترو در شرایط دمای طرح تابستان. (الف) عدم استفاده از ایرواشر. (ب) استفاده از ایرواشر. ۱۱۹.....
- شکل ۵-۲۰: وضعیت آسایش حرارتی مترو در دمای  $15^{\circ}\text{C}$ . ۱۲۰.....
- شکل ۵-۲۱: وضعیت آسایش حرارتی مترو در دمای  $20^{\circ}\text{C}$ . ۱۲۱.....
- شکل ۵-۲۲: تاثیر فن ایستگاه بر روی تهویه مترو. ۱۲۲.....
- شکل ۵-۲۳: وضعیت آسایش حرارتی مترو در دمای  $15^{\circ}\text{C}$  در صورتی که فن ایستگاه و دستگاه ایرواشر در سیستم تهویه حضور نداشته باشند. ۱۲۳.....
- شکل ۵-۲۴: سطوح مربوط به دمای  $24^{\circ}\text{C}$  در صورتی که دمای شهر مشهد  $11^{\circ}\text{C}$  باشد. ۱۲۴.....
- شکل ۵-۲۵: سطوح مربوط به دمای  $24^{\circ}\text{C}$  در صورتی که دمای شهر مشهد  $0^{\circ}\text{C}$  باشد. ۱۲۵.....
- شکل ۵-۲۶: دستگاه اندازه‌گیری سرعت و دمای هوا (دستگاه ABH-4225). ۱۲۸.....
- شکل ۵-۲۷: نمودار همگرایی باقیمانده‌های مربوط به مدل CFD ساخته شده متناسب با شرایط اندازه‌گیری. ۱۲۹.....
- شکل ۵-۲۸: کنتورهای سرعت در دهانه ورودی و خروجی‌های مدل CFD ساخته شده برای اعتبار سنجی. ۱۳۱.....

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق ..... ۲۲
- ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق ..... ۲۳
- ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق ..... ۲۴
- ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق ..... ۲۵
- ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق ..... ۲۶
- ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق ..... ۲۷
- ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق ..... ۲۸
- ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق ..... ۲۹
- جدول ۱-۳: برخی از استانداردهای توسعه شده تهویه برای فضاهای گوناگون ..... ۳۶
- جدول ۲-۳: میزان هوای لازم برای هر فرد در قسمت‌های مختلف مترو مشهد ..... ۳۷
- جدول ۳-۳: نرخ تبادل حرارت بدن با محیط خارج در فعالیت‌های مختلف ..... ۴۳
- جدول ۱-۴: شرایط مرزی موجود در ANSYS FLUENT و ویژگی‌های آن‌ها ..... ۷۵
- جدول ۲-۴: روشهای شبکه‌بندی ..... ۸۵
- جدول ۳-۴: ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار تعامد ..... ۸۶
- جدول ۴-۴: ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار کشیدگی ..... ۸۸
- جدول ۱-۵: شرایط مرزی در هندسه ایستگاه ..... ۹۶
- جدول ۲-۵: مشخصات شبکه‌بندی ایستگاه ..... ۹۷
- جدول ۳-۵: مشخصات شبکه‌بندی اتاق تأسیسات ..... ۹۹
- جدول ۴-۵: بررسی تعداد و سائز المان بر روی جواب نهایی ..... ۱۰۰
- جدول ۵-۵: مقایسه شبکه‌بندی‌های مختلف در بررسی استقلال از شبکه ..... ۱۰۱
- جدول ۶-۵: بررسی نتایج مربوط به استقلال از شبکه ..... ۱۰۴

- جدول ۷-۵: مشخصات شرایط آب و هوایی برای طراحی سیستم تهویه ..... ۱۰۴
- جدول ۸-۵: ویژگی‌های اصطکاک سطوح ..... ۱۰۴
- جدول ۹-۵: میزان هوای لازم و سرعت هوای مجاز در قسمت‌های مختلف ..... ۱۰۵
- جدول ۱۰-۵: منابع پایا و نا پایا حرارتی ..... ۱۰۵
- جدول ۱۱-۵: شرایط مرزی ورودی‌ها و خروجی‌های مدل ایستگاه ..... ۱۰۶
- جدول ۱۲-۵: شرایط مرزی دیوارها در مدل ایستگاه ..... ۱۰۷
- جدول ۱۳-۵: نتایج سرعت و دبی هوای ورودی و خرجی‌ها در بررسی پارامتری ..... ۱۱۱
- جدول ۱۴-۵: نتایج مدلسازی CFD برای تابستان و زمستان ..... ۱۱۴
- جدول ۱۵-۵: مطالعه پارامتری دمای سطح شهر و متوسط دمای قسمت‌های شلوغ مترو ..... ۱۱۸
- جدول ۱۶-۵: مطالعه پارامتری دمای سطح شهر و متوسط دمای قسمت‌های عمومی مترو ..... ۱۲۲
- جدول ۱۷-۵: واحدهای اندازه‌گیری سرعت توسط دستگاه ABH-4225 ..... ۱۲۷
- جدول ۱۸-۵: مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری واقعی و نتایج مدل CFD ..... ۱۳۰
- جدول ۱۹-۵: مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری واقعی و نتایج مدل CFD و تاثیر خروجی اضطراری ..... ۱۳۱
- جدول ۲۰-۵: انتخاب استراتژی‌های مختلف در شرایط دمایی متفاوت ..... ۱۳۲

## فهرست علائم و اختصارات

V	حجم المان
S	سطح بسته المان (سطح کنترل)
q	بردار سرعت در میدان جریان
u	سرعت در راستای x
v	سرعت در راستای y
w	سرعت در راستای z
p	فشار
$\rho$	چگالی
T	دما
t	زمان
$\tau$	تنش برشی
F	مولفه اسکالر بردار نیرو
a	مولفه اسکالر بردار شتاب
f	نیروی جسمی وارد بر حجم المان سیال
N	نیروی سطحی خالص
m	جرم المان سیال
$\dot{q}$	انتقال حرارت به صورت هدایت
k	ضریب هدایت حرارتی
e	انرژی داخلی حرکت ملکولها
l	طول جریان
$\mu$	لزجت سینماتیکی

$R_e$	عدد رینولدز جریان
$\mu_t$	ویسکوزیته آشفتگی
K	انرژی جنبشی جریان آشفته
$\varepsilon$	سرعت مقیاس بزرگترین گردابه
$u_l$	سرعت مقیاس بزرگترین گردابه
$\delta_l$	طول مقیاس بزرگترین گردابه
$\sigma_k$	عدد پرانتل جریان آشفته
$\sigma_\varepsilon$	عدد اشمیت جریان آشفته

فصل اول

کلیات طرح تحقیق



امروزه با توجه به توسعه شهرها و افزایش جمعیت، نیاز به گسترش راه‌های ارتباطی در شهرهای بزرگ احساس می‌شود. وسایل حمل‌ونقل عمومی به دلایلی همچون کم‌هزینه بودن و نداشتن مشکلات جانبی در بین مردم از استقبال بیشتری برخوردار هستند. وجود وسایل حمل‌ونقل عمومی در شهرها باعث بروز مشکلاتی همچون آلودگی هوا و ترافیک شهری می‌شود. امروزه استفاده از مترو در کلان‌شهرها جایگاه ویژه‌ای یافته است که نه تنها مشکلات فوق را کاهش داده است بلکه از سرعت و کیفیت بالایی در حمل‌ونقل عمومی داخل شهری برخوردار است [۱].

تهویه یکی از مهم‌ترین خدمات فنی در زمان حفر و بهره‌برداری تونل‌ها است. زمان بهره‌برداری از تونل‌ها همواره تعداد افراد بیشتری از آن استفاده می‌کنند؛ این عامل نشان می‌دهد که سیستم تهویه در زمان بهره‌برداری دارای اهمیت بیشتری نسبت به زمان حفر آن است [۲].

امروزه با توسعه علوم کامپیوتر و افزایش سرعت کامپیوترها، علم CFD جایگاه ویژه‌ای در نزد مهندسين این رشته یافته است. طراحی سیستم تهویه برای مترو با توجه به تعداد زیاد ایستگاه‌ها و همچنین استفاده روزافزون مردم از مترو، یک طراحی دقیق و بی‌نقص را می‌طلبد. پیشرفت کامپیوترها و ظهور نرم‌افزارهای مربوط به دینامیک سیالات محاسباتی، استفاده از CFD<sup>۱</sup> را برای پیش‌بینی توزیع هوا و بهینه‌سازی‌های مربوط به طراحی سیستم تهویه در مترو آسان کرده است [۳].

## ۱-۲- بیان مسئله

شرایط محیط‌زیست انسان تأثیر مستقیمی بر چگونگی حالات روانی، وضعیت فیزیکی، نحوه انجام کار و به‌طور کلی تمام شئون زندگی او دارد. امروزه به دلیل رفت‌وآمد و حضور تعداد زیادی از مسافران در تونل‌ها، قطارها و ایستگاه‌های مترو و با توجه به این که مترو بخشی از محیط زندگی این افراد شده است

---

۱- Computational Fluid Dynamics

لذا تهویه مطبوع امری لازم در زمان بهره‌برداری است. طراحی سیستم تهویه مناسب برای مترو باید با توجه به نیاز آسایش حرارتی مسافران انجام شود.

توسعه و پیشرفت علوم کامپیوتر و استفاده گسترده از زبان‌های برنامه‌نویسی منشأ پیدایش CFD برای حل عددی معادلات مکانیک سیالات در قرن حاضر شد. CFD یا روش عددی، یک روش جدید، سریع و کاربردی در دنیای امروز است که به حل معادلات مکانیک سیالات می‌پردازد.

طراحی سیستم تهویه با استفاده از مدل CFD به‌عنوان سومین روش تحلیل جریان سیالات بعد از روش‌های آزمایشگاهی-تجربی و روش تئوری شناخته‌شده است و دارای مزایای زیر است [۴]:

- کاهش زمان دستیابی به نتایج

- کاهش هزینه ساخت

- استفاده از روند حل نتایج

- حل شرایط وابسته به زمان در حالت‌های مختلف

- تحلیل شرایط مرزی مختلف

با توجه به آنچه گفته شد در طراحی سیستم تهویه برای مترو پارامترهای زیادی همچون تعداد ورودی و خروجی‌ها، بارهای حرارتی تولید شده در مترو و این که افراد زیادی از مترو استفاده می‌کنند باید سیستم تهویه مناسب با نیازهای افراد و محیط طراحی شود. علم CFD قابلیت‌های زیادی در زمینه شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت دارد بنابراین در این پایان‌نامه از مدل‌سازی CFD برای طراحی سیستم تهویه استفاده شده است.

### ۱-۳- اهمیت تحقیق

سیستم تهویه مترو با نیروی الکتریسیته کار می‌کند، چون راندمان هیچ وسیله الکتریکی ۱۰۰٪ نیست بنابراین مقداری گرما بصورت هدررفت وارد محیط مترو که یک محیط بسته زیرزمینی است می‌شود. در زمان بهره‌برداری از مترو سیستم تهویه برای ایجاد محیطی مناسب جهت آسایش حرارتی مسافران و کارکنان اهمیت زیادی دارد، با توجه به این موضوع طراحی و بررسی سیستم تهویه مترو اهمیت این تحقیق را نشان می‌دهد. ضعف در سیستم تهویه باعث بروز مشکلات تنفسی برای مسافران و کارکنان و کاهش عمر تجهیزات مترو می‌شود؛ از طرفی سیستم تهویه با ظرفیت بیشتر از نیاز محیط نه تنها باعث افزایش هزینه‌های مربوط به تهویه است، بلکه باعث بروز مشکلاتی همچون نارضایتی افراد می‌شود. سیستم تهویه در مترو باید قادر باشد تا اکسیژن لازم برای کارکنان و مسافران را فراهم کند و علاوه بر آن قادر به تأمین آسایش حرارتی باشد. شدت جریان لازم برای تأمین اکسیژن و مقابله با گرمای تولیدشده قابل محاسبه است. اگر شدت جریانی که در اثر تهویه طبیعی و اثر پیستونی ایجاد می‌شود کمتر از شدت جریان محاسبه‌شده برای مترو باشد طراحی سیستم تهویه مکانیکی ضروری است و باید سیستم تهویه مکانیکی مناسب طراحی شود.

مهم‌ترین پارامتر مؤثر در مورد تهویه ایستگاه‌ها و تونل‌ها، گرمای تولیدشده به وسیله قطار و در داخل قطار تعداد مسافران است. در شرایط اضطراری همچون آتش‌سوزی، کنترل و خارج ساختن دود و هوای آلوده از طریق ایجاد یک سرعت حداقل بحرانی به منظور خارج ساختن دود در جهت دلخواه از مهم‌ترین وظایف سیستم تهویه است [۲].

### ۱-۴- ضرورت تحقیق

با توجه به این که خط ۲ مترو مشهد مرحله حفاری خود را به پایان رسانده است و در حال آماده‌سازی برای بهره‌برداری است لذا طراحی یک سیستم تهویه مناسب برای زمان بهره‌برداری لازم و ضروری به

نظر می‌رسد. خط ۲ مترو مشهد ۱۴/۵ کیلومتر طول دارد و دارای ۱۳ ایستگاه است که شمال مشهد را به جنوب آن متصل می‌کند. بهره‌برداری از فاز یک خط ۲ در بهمن ماه سال ۱۳۹۵ انجام شد و شش ایستگاه اول این خط (فاز ۱) به بهره‌برداری رسید [۵].

طراحی سیستم تهویه برای خط ۲ مترو مشهد یک فعالیت بحرانی محسوب می‌شود به این معنی که هرچقدر مدت‌زمان این فعالیت به تعویق بیفتد، زمان اتمام و بهره‌برداری از مترو نیز به تعویق می‌افتد. این امر می‌تواند خسارت‌های مالی و اجتماعی را برای شرکت بهره‌بردار و همچنین مردم به همراه داشته باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طراحی سیستم تهویه مناسب و کارآمد از جمله فعالیت‌های لازم و ضروری این پروژه است. روش‌های زیادی برای طراحی سیستم تهویه وجود دارد که عبارتند از روش تجربی، روش آزمایشگاهی و روش عددی. امروزه با توجه به قابلیت‌های حل عددی با استفاده از این روش به طراحی سیستم‌های تهویه پرداخته می‌شود. یکی از روش‌های عددی که در این زمینه استفاده می‌شود روش CFD است. با توجه به این موضوع که علم CFD نتایج بسیار خوبی را در زمینه بررسی سیستم‌های تهویه نشان داده است بنابراین از علم CFD برای انجام این پایان‌نامه استفاده شد.

## ۱-۵- هدف تحقیق

با توجه به اهمیت مسئله حمل‌ونقل شهری در شهرهای بزرگ و استقبال زیاد مسافری از مترو و لزوم تهویه در ایستگاه‌ها، واگن‌ها و تونل‌ها، اقدام به تحقیق درباره این موضوع و انتخاب آن به‌عنوان موضوع پایان‌نامه شده است. اهداف انجام پایان‌نامه عبارت‌اند از:

- ۱) ساخت مدل CFD برای خط ۲ مترو مشهد.
- ۲) محاسبه میزان هوای لازم جهت تهویه ایستگاه‌ها و تونل خط ۲ مترو.
- ۳) بررسی سیستم تهویه در شرایط آب و هوایی مختلف و انتخاب استراتژی مناسب.

## ۱-۶- معرفی مترو مشهد

شهر مشهد واقع در شمال شرقی استان خراسان رضوی روزانه ۱۰ میلیون نفر را از طریق حمل و نقل عمومی جابجا می‌کند که این میزان طی ۱۰ سال آینده به ۱۶ میلیون نفر در روز خواهد رسید. بر اساس مطالعات جامع حمل و نقل شهر مشهد و مطالعات توسعه شبکه حمل و نقل ریلی که توسط پژوهشکده حمل و نقل در دانشگاه صنعتی شریف انجام شد، شهر مشهد نیازمند ۵ خط مترو است (شکل ۱-۱). توسعه خطوط مترو به شهرهای جدید چون گل‌بهار در شمال و بینالود در جنوب نیز پیش‌بینی و مراحل تصویب آن نیز سپری شده است [۶].

خط ۲ مترو مشهد از انتهای طبرسی شمالی آغاز و پس از قطع کمربندی بزرگراه بسیج از منطقه طلاب عبور کرده و بافاصله اندکی از چهارراه مقدم عبور می‌کند. این مسیر از محل‌های پرترددی همچون میدان راه‌آهن، میدان شهدا و میدان سعدی عبور می‌کند. خط ۲ مترو مشهد با ادامه مسیر خود در میدان تقی‌آباد (ایستگاه شریعتی) با خط ۱ برخورد می‌کند. مسیر این مترو با عبور از کوه سنگی در میدان فضل‌ابن شاذان (میدان جام‌عسل) خاتمه می‌یابد [۸]. فاز ۱ خط ۲ شامل ۶ ایستگاه مشابه است که برای طراحی و مدل‌سازی از نقشه‌های معماری ایستگاه C2 یعنی ایستگاه فجر استفاده شده است.



شکل ۱-۱: خطوط مترو طراحی شده برای شهر مشهد [۷]

طول خط ۲ مترو مشهد ۱۴/۵ کیلومتر است که ۰/۵ کیلومتر آن روباز و هم‌سطح و ۱۴ کیلومتر آن به‌صورت زیرزمینی اجرا خواهد شد. ظرفیت پیش‌بینی شده ۱۶۰۰۰ مسافر در ساعت در هر جهت است که توسط ۲۰ دستگاه به همراه ۱۰۰ واگن انجام خواهد شد و ظرفیت هر واگن در طرح ۸۰۰ نفر است. این خط شامل ۱۲ ایستگاه زیرزمینی است که عمق آن‌ها بین ۱۰ تا ۲۳ متر متغیر است و برای حفاری این مسیر از دستگاه حفار تمام مقطع<sup>۱</sup> (TBM) با قطر ۹ متر استفاده شده است [۹].

## ۱-۷- فرضیات تحقیق

برای حل مسئله مربوط به سیستم تهویه از روش CFD استفاده شد. این مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Workbench انجام شد و تحلیل سیالاتی مسئله در محیط ANSYS Fluent انجام شد. با توجه به دانسیته هوا در سطح شهر مشهد و این موضوع که ورودی و خروجی‌های هوا به سطح آزاد هوا راه دارند سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفته شد و دانسیته هوا  $1/22 \text{ Kg/m}^3$  در نظر گرفته شد. حل مسئله مستقل از زمان در نظر گرفته شد و برای مدل‌سازی اغتشاش از روش  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شد. تاثیر پیستونی به علت حرکت قطارها در خلاف جهت هم در یک تونل در نظر گرفته نشد و نتایج مدل نهایی بدون در نظر گرفتن تاثیر پیستونی بر روی سیستم تهویه بدست آمد. بار حرارتی ناشی از ترمز‌گیری، شتاب‌گیری و بار حرارتی پله برقی‌ها در مدل CFD اعمال شد.

## ۱-۸- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه‌ای که پیش رو است با عنوان "طراحی سیستم تهویه خط ۲ مترو مشهد با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی" جمع‌آوری شده است و شامل فصل‌ها و مراحل زیر است:

- **فصل اول:** در این فصل کلیاتی از طرح تحقیق شامل بیان مسئله، اهمیت انجام تحقیق، ضرورت انجام تحقیق، هدف تحقیق و قلمرو تحقیق بیان شد.
- **فصل دوم:** در این فصل ابتدا مبانی نظری تحقیق بیان شده و انواع سیستم‌های تهویه در مترو مورد بررسی قرار گرفته است. مفاهیم مربوط به CFD، نحوه طراحی سیستم‌های تهویه و ارزیابی آن‌ها در این فصل ارائه شده است. در انتهای این فصل مختصری در مورد پیشینه تحقیق بحث شده است.
- **فصل سوم:** در این فصل به بررسی تخصصی سیستم تهویه در مترو، اجزای تشکیل‌دهنده آن نحوه ایجاد شرایط آسایش حرارتی و پارامترهای طراحی سیستم تهویه پرداخته شده است.
- **فصل چهارم:** عدم شناخت کافی در مورد علم دینامیک سیالات محاسباتی باعث می‌شود تا نتوانیم یک حل دقیق و درست از مسئله داشته باشیم؛ فصل چهارم به توضیح مفصل و کاربردی از CFD پرداخته است. آنچه از علم CFD در حل مسئله لازم است در این فصل نگاشته شده است.
- **فصل پنجم:** روند حل مسئله و نمودارها و بردارهای لازم برای ارائه گزارش‌ها و نتایج مربوط به مدل‌سازی در این فصل آورده شده است.
- **فصل ششم:** نتیجه‌گیری و پیشنهادهای لازم در این فصل ارائه شده است.

## فصل دوم

مبانی نظری و پیشینه تحقیق



## ۲-۱- مقدمه

تردد ناوگان ریلی برقی در داخل تونل‌ها که یک محیط بسته است باعث تولید گرما از منابع مختلف از جمله سیستم ترمز، سیستم روشنایی، سیستم تهویه، مسافرین و موتور الکتریکی می‌شود. اگر هوای سالم و تازه جریان پیدا نکند و هوای آلوده و گرم از محیط خارج نشود به تدریج باعث افزایش دما و ایجاد محیطی نامناسب می‌شود. این مسئله در مواقع اضطراری از قبیل خاموش شدن قطار در داخل تونل، آتش‌سوزی در داخل تونل یا ایستگاه‌ها می‌تواند فاجعه‌آمیز باشد. در دهه‌های اولیه ساخت متروها، تهویه خط را موکول به تهویه هوا در اثر حرکت پیستونی قطار در داخل تونل می‌کردند. تهویه ناشی از اثر پیستونی باعث به حرکت درآمدن جریان هوا در جهت حرکت قطار می‌شود. این امر برای مسیرهای مجزا و شرایط عادی مناسب بود ولی در صورتی که قطاری از جهت مخالف نیز تردد کند از تأثیر پیستونی قطار کاسته می‌شود و هوا صرفاً به صورت موضعی پس‌وپیش حرکت می‌کند. به تدریج با در نظر گرفتن ایمنی و حوادث از جمله آتش‌سوزی صورت گرفته در تونل مونت‌بلان<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۹ که ۳۴ سال از عمر آن گذشته بود و منجر به کشته شدن ۳۸ نفر شد احساس خطر و طراحی برای مواقع آتش‌سوزی مورد توجه قرار گرفت. امروزه با توجه به استفاده زیاد مردم از مترو و حضور افراد زیادی در ایستگاه‌ها و واگن‌ها تأمین شرایط آسایش حرارتی امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد [۱۰].

## ۲-۲- دلایل نیاز به سیستم تهویه در مترو

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد تأمین شرایط آسایش حرارتی برای مسافران مهم‌ترین عامل تهویه در مترو است که برای دستیابی به این مهم باید موارد زیر را در نظر گرفت [۱۱].

✓ تأمین هوای تازه برای نیازهای فیزیولوژیکی مسافران.

✓ کاهش و از بین بردن گازهای مضر مثل کربن‌دی‌اکسید.

---

۱- Mont-Blanc

✓ رفع رطوبت محیط.

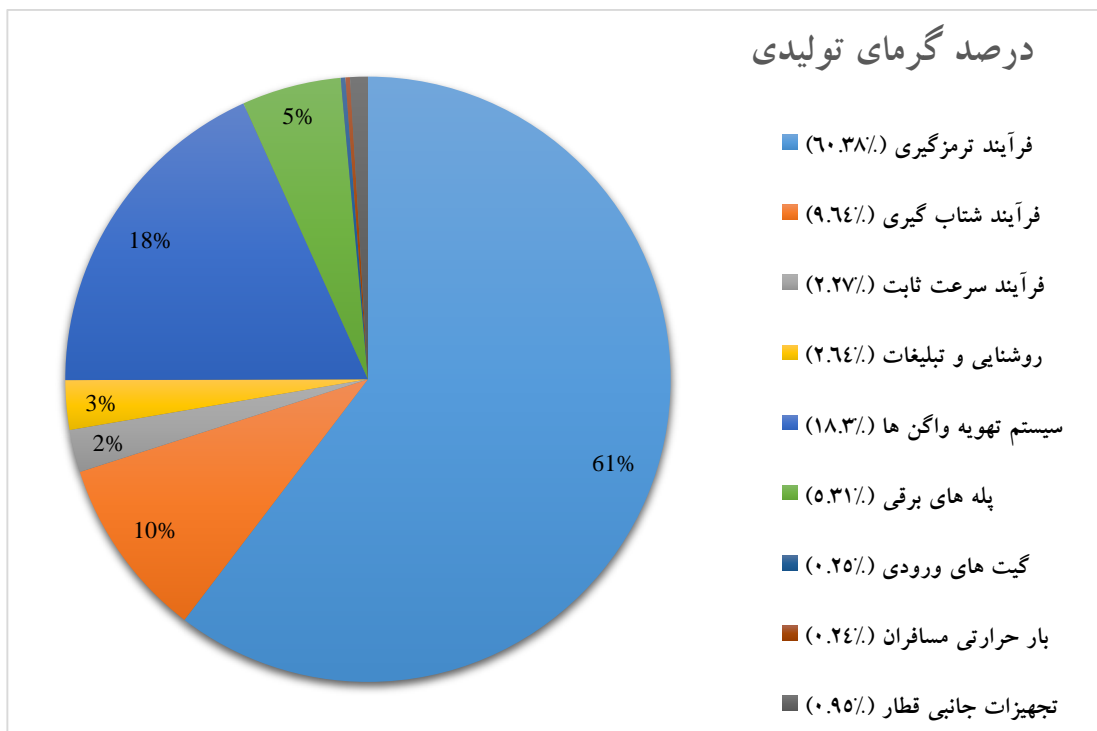
✓ خارج کردن مقدار زیادی از حرارت ناشی از کارکرد موتور قطار، گرمای زمین، واحد ترمز، روشنایی و گرمای حاصل از کارکرد فن.

شرایط راحتی یک فرد بستگی به نرخ اتلاف گرمایی بدن او دارد که به دما، رطوبت و سرعت هوای گذرنده از بدن او بستگی دارد. گرمای بدن توسط تعریق، همرفت و تابش به بیرون منتقل می‌شود. با توجه به مقادیر عظیم گرما که در تونل‌ها و ایستگاه‌های زیرزمینی ایجاد می‌گردد، یک تهویه ساده کارآمد نیست، بخصوص که دما و رطوبت بیرون بالا باشد.

## ۲-۳- بار حرارتی تولیدی در ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو

سیستم حمل‌ونقل ریلی در متروها با استفاده از نیروی الکتریسیته کار می‌کند، این بدان معناست که آلودگی با عنوان دوده و یا گازهای مضر وجود ندارد و یا تولید آن از منابعی به جز لوکوموتیوها و واگن‌ها است.

آنچه در زمینه تهویه مترو نقش کلیدی را بر عهده دارد کنترل حرارت محیط است. میزان حرارت تولیدی در ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو به دو دسته‌ی منابع حرارتی پایا و منابع حرارتی ناپایا تقسیم می‌شود. منابع حرارتی پایا از جمله لامپ‌های روشنایی ایستگاه و تونل، پله‌های برقی، بار حرارتی مسافران و منابع حرارتی نا پایا از قبیل بار ناشی از ترمز گیری و شتاب گیری قطار است. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که بیشترین گرمای تولیدشده در محیط مترو طی فرایند ترمز گیری ایجاد می‌شود. گرمای تولیدی توسط هر کدام از منابع حرارتی پایا و نا پایا در شکل ۲-۱ آورده شده است [۱۲].



شکل ۱-۲: نتایج میزان گرمای تولیدی در مترو [۱۲].

## ۲-۴- انواع سیستم های تهویه تونل ها و ایستگاه ها

انتخاب نوع سیستم تهویه تونل و فضاهای زیرزمینی به پارامترهای مختلف از قبیل هندسه، طول تونل، نوع کاربری، اهمیت آن و عوامل دیگر بستگی دارد. انتخاب مناسب سیستم تهویه در کارایی و هزینه های بهره برداری مؤثر است. سیستم تهویه نصب شده در یک تونل باید قادر باشد تا یک محیط امن تحت هر دو شرایط اضطراری و شرایط عادی را برای اطمینان کاربران آن حاصل نماید. از آنجاکه در یک حادثه آتش سوزی حرکت دود باید کنترل شود، طراحی سیستم های تهویه تونل با توجه به پارامترهای مختلف، از جمله آتش و ارتفاع دود و شعله مورد نظر، صورت می پذیرد. در شرایط عادی طراحی سیستم تهویه تونل باهدف جلوگیری از تجمع گازهای گلخانه ای در سطح تونل و راه پایی آنها به محیط هایی که باعث بروز خطر می شود، صورت می پذیرد [۱۳].

سیستم‌های تهویه برای مترو و تونل را در حالت کلی به دودسته‌ی تهویه طبیعی<sup>۱</sup> و تهویه مکانیکی<sup>۲</sup> تقسیم می‌کنند. در سیستم تهویه طبیعی (تهویه با اثر پیستونی) بدون نیاز به هیچ هزینه‌ای عمل تهویه انجام می‌شود ولی در مورد تهویه مکانیکی بسته به نوع آن هزینه‌های مربوط به تهویه تغییر می‌کند. انواع سیستم‌های تهویه مکانیکی که برای تونل‌ها به کار می‌رود سیستم تهویه طولی<sup>۳</sup>، سیستم تهویه نیمه عرضی<sup>۴</sup> و سیستم تهویه عرضی<sup>۵</sup> است. بسیاری از تغییرات و ترکیب سیستم‌های تهویه، ترکیبی از سیستم‌های طولی و نیمه عرضی می‌باشد [۱۰ و ۱۳].

## ۲-۴-۱- تهویه طبیعی و تهویه ناشی از اثر پیستونی

جریان هوا در داخل تونل به دلیل اختلاف فشار دو دهانه آن و یا حرکت هوا در اثر حرکت وسایل نقلیه در داخل تونل را تهویه طبیعی می‌گویند. این شیوه برای تونل‌های یک‌طرفه که طول کوتاهی دارند مناسب است ولی عواملی همچون وزش باد و ترافیک دوطرفه می‌تواند این اثر حرکت را خنثی نماید. به‌طور کلی می‌توان گفت که در مورد تونل‌های با بیش از ۱۷۰ متر، تهویه باید به‌صورت مکانیکی انجام شود. حرکت قطار در داخل تونل با سرعتی متفاوت از سرعت جریان هوا موجب اختلاف فشار در داخل تونل می‌شود فرم بدنه واگن و سرعت قطار در مقدار این اختلاف فشار بسیار مؤثر است [۱۳].

## ۲-۴-۲- تهویه طولی

سیستم تهویه طولی برای حالتی قابل کاربرد است که تونل مورد استفاده یک تونل یک‌طرفه باشد. در این چنین سیستمی همواره در مواقع آتش‌سوزی دود به یک‌طرف از دهانه تونل (دهانه خروج هوا) هدایت می‌شود. در مواقع آتش‌سوزی برای نجات مسافران و کنترل آتش، سیستم تهویه طولی به‌شدت به طول

---

۱- Natural Ventilation

۲- Mechanical Ventilation

۳- Longitudinal Ventilation

۴- Semi-Transverse Ventilation

۵- Transverse Ventilation

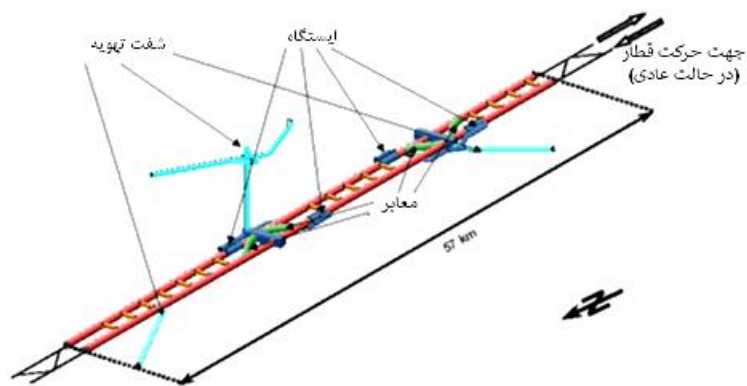
تونل وابسته است این بدان معناست که باید زمان کافی برای فرار مسافران و انتقال آن‌ها به یک محیط امن را در زمان طراحی در نظر گرفت. این موضوع باید توسط یک تیم مدیریت ایمنی و آتش، به‌خوبی پشتیبانی شود. نصب و راه‌اندازی یک سیستم تشخیص حرارت در طول تونل به‌عنوان یک دستگاه نظارت می‌تواند کمک شایانی در زمینه تشخیص و موقعیت خطر داشته باشد [۱۳].

میزان هوای لازم در تهویه طولی به میزان آلودگی تونل و نرخ گرمای تولیدشده در آن بستگی دارد. فشار لازم برای این سیستم با توجه به اصطکاک و افت‌های موضعی تعیین می‌شود. این سیستم برای طول‌های تا ۸۰۰ متر طراحی می‌شود که چنانچه طول تونل بیشتر از این حالت باشد برای مقابله با افت اصطکاکی سرعت جریان هوا را باید زیاد کرد که موجب نارضایتی مسافری می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت روش تهویه طولی از سایر روش‌های تهویه مکانیکی اقتصادی‌تر است [۱۰].

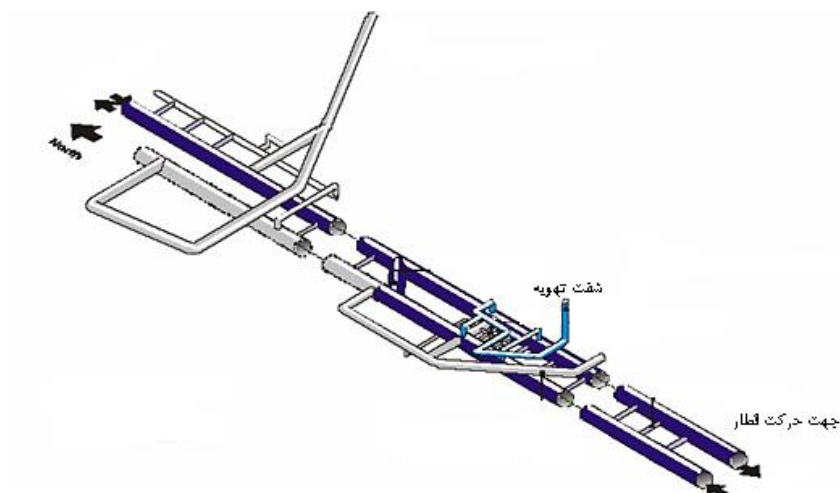
استفاده از تهویه طولی در تونل‌های دوطرفه به علت اغتشاش ایجادشده توسط اثر پیستونی از کارایی چندانی برخوردار نیست که این مورد را می‌توان از معایب این سیستم در نظر گرفت. علاوه بر این، معایب دیگری در این سیستم وجود دارد که به آن اشاره می‌شود. در مواقع آتش‌سوزی به‌سرعت بالای هوا در طول تونل نیاز داریم و علاوه بر آن پخش دود در کل طول تونل (معمولاً از محل حادثه تا خروجی هوا) را خواهیم داشت. تحت شرایط عادی هوا از یک دهانه وارد می‌شود و آلودگی‌ها را در خود می‌آمیزد و از دهانه دیگر خارج می‌شود در نتیجه دهانه خروجی همواره از آلودگی زیادی برخوردار است که این آلودگی‌ها وابستگی مستقیم به طول تونل دارد. وجود جریان هوای محلی منطقه نیز می‌تواند باعث ایجاد آلودگی شدید در نیمه دوم طول تونل شود. علاوه بر موارد ذکرشده در موقع آتش‌سوزی ممکن است نیاز بیشتر به هوا جهت تهویه مناسب لازم شود [۱۳].

با توجه به آنچه در مورد این سیستم تهویه گفته شد در مواقعی می‌توان از این سیستم استفاده کرد که طول تونل کوتاه باشد و یا این که در تونل‌های طولانی به دلیل مقابله با سرعت زیاد هوا شفت‌هایی برای کنترل سرعت هوا در مکان‌های مناسب طراحی شود. در تونل قطارهای شهری به خاطر وجود

ایستگاه‌ها و شفت تهویه در مجاورت ایستگاه این شرایط برقرار است. از جمله متروهایی که از این روش برای تهویه استفاده می‌کنند می‌توان به تونل گوتاردبیز<sup>۱</sup> (شکل ۲-۲) و تونل لوتزبرگ<sup>۲</sup> (شکل ۳-۲) در سوئیس اشاره کرد. تونل گوتاردبیز به صورت دوقلو طراحی و دارای سیستم تهویه طولی است این تونل دارای ویژگی‌هایی همچون: ایجاد راه‌های دسترسی در هر ۳۲۵ متر، ساخت ایستگاه فرار و نجات در داخل هر تونل، طراحی جت فن‌ها جهت به جریان انداختن دبی موردنیاز در مواقع اضطراری به همراه سیستم‌های تشخیص شرایط اضطراری است [۱۰ و ۱۳].



شکل ۲-۲: تونل گوتاردبیز در سوئیس.



شکل ۳-۲: تونل لوتزبرگ در سوئیس به طول ۲۰ کیلومتر مشابه با تونل بلارگ [۱۰].

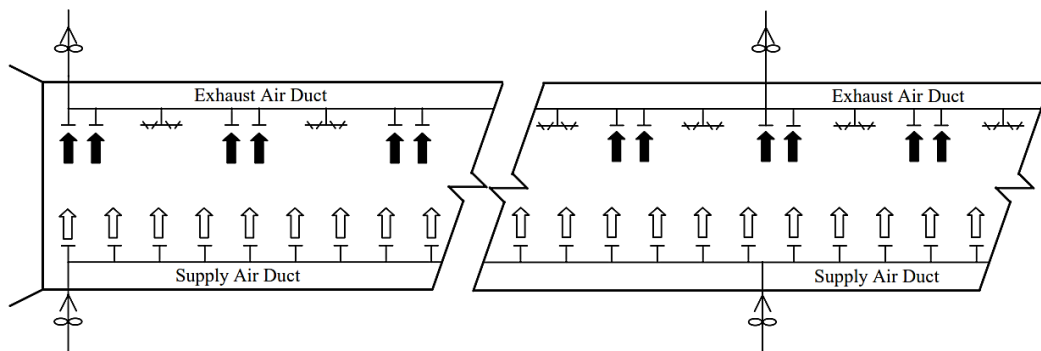
۱- Gotthard Base Tunnel

۲- LuteshBerg Tunnel

## ۲-۴-۳- تهویه عرضی

سیستم تهویه کاملاً عرضی در فضاهای بزرگ (تونل‌های طویل و بزرگ مقطع) و با تجهیزات خاص به کار گرفته می‌شود. هوای آلوده به صورت یکنواخت از کل طول تونل تخلیه می‌شود، بنابراین به مجرای ورودی هوا و خروج هوا در کل طول تونل نیاز است. در این سیستم جریان هوا در عرض تونل انجام می‌پذیرد و معمولاً به این صورت است که هوا از داکت کف تونل وارد تونل شده عمل تهویه را انجام می‌دهد و از داکت بالا خارج می‌شود. با این سیستم تهویه سطح آلاینده‌ها و همچنین سرعت هوا در طول تونل یکنواخت است (شکل ۲-۴).

مواقع اضطراری که شامل آتش‌سوزی و پخش دود است این سیستم در کنترل دود بسیار بهتر از سیستم طولی عمل کرده و از پخش دود در طول تونل جلوگیری می‌کند. این سیستم دود را از نزدیک‌ترین مجراهای خروج هوا خارج می‌کند که در نتیجه محدوده آلوده به دود زیاد بزرگ نمی‌شود. اجرای داکت‌های ورود و خروج هوا هزینه‌های زیادی را در بردارد که از معایب این روش به شمار می‌آید [۱۴].

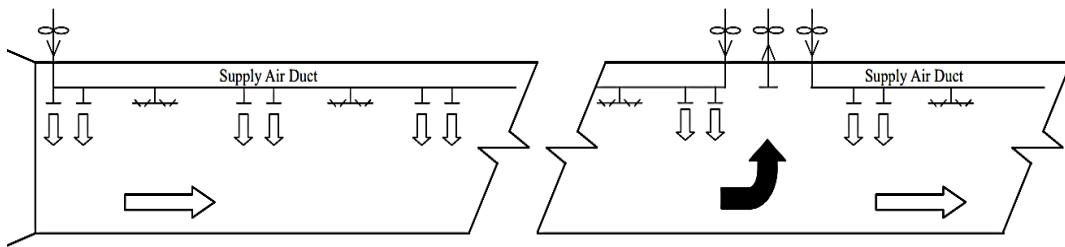


شکل ۲-۴: سیستم تهویه کاملاً عرضی [۱۴].

## ۲-۴-۴- تهویه نیمه عرضی

هوا ورودی در سیستم تهویه نیمه عرضی مانند روش طولی است و هوای آلوده توسط داکت‌هایی که در کل طول تونل قرار دارند خارج می‌شود. این سیستم همواره نیاز به یک منبع اصلی تولید هوای ورودی

دارد. با استفاده از سیستم تهویه نیمه عرضی سطح آلاینده‌ها در کل طول تونل نسبتاً یکنواخت است. نقاط تخلیه هوا بافاصله‌های منظم در کل طول تونل طراحی می‌شوند (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵: سیستم تهویه نیمه عرضی [۱۴].

این سیستم به دلیل کنترل بهتر دود در مواقع آتش‌سوزی از سیستم تهویه طولی و به دلیل هزینه پایین اجرا به علت احداث یک مسیر داکت کمتر از سیستم کاملاً عرضی بهتر است [۱۴].

## ۲-۵- بررسی سیستم‌های متداول تهویه در مترو

در زمینه طراحی سیستم تهویه، مترو را به دو بخش تقسیم می‌کنند. بخش اول ایستگاه‌ها و قسمت‌هایی است که برای استفاده عموم در نظر گرفته شده‌اند و بخش دوم تونل‌های مخصوص عبور قطار است که حضور افراد عادی در آن ممنوع است. منظور از تهویه مترو فراهم ساختن هوایی مطبوع و مناسب برای حضور مسافران و کاربران آن است. برای شبیه‌سازی شرایط پیچیده و دینامیکی که در محیط مترو اتفاق می‌افتد استفاده از روش‌های عددی در طراحی سیستم تهویه لازم است. برای طراحی سیستم تهویه مترو باید معیارهایی هم چون سرعت هوا، میزان آلودگی هوا، دمای محیط، رطوبت و فشار را در نظر گرفت.

سیستم تهویه اکثر تونل‌های دنیا به خاطر مشابه بودن شرایط از لحاظ عمق تونل‌ها، فاصله بین ایستگاه‌ها و محدودیت فضای سطح خیابان‌ها نسبتاً هم‌شکل است که نمونه آن در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. در این سیستم شفت‌های تهویه مجهز به جت فن در نزدیک ایستگاه قرار دارند، این شفت‌ها وظیفه تهویه تونل‌ها و ایستگاه‌ها را بر عهده دارند. استفاده از جت فن‌ها در جهت شفت خروج



هوا در تونل الزامی است، چراکه عدم استفاده از جت فن و مقاومت آیرودینامیکی زیاد قطعه تونل باعث می‌شود که کمتر از ۲۰٪ هوای ورودی وارد تونل شود [۱۰].



شکل ۲-۶: موقعیت شفت‌ها و تأثیر جت فن در تقسیم هوای ورودی از شفت [۱۰].

امروزه با توسعه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به راحتی می‌توان سیستم تهویه یک مترو را از نظر کارایی و عملکرد آن برآورد کرد. در CFD یک مدل هندسی برای محیط مورد استفاده ساخته می‌شود و روش‌هایی از تهویه را که مناسب پیش‌بینی شده‌اند بر روی مدل پیاده می‌شود. مدل ساخته شده بنا به اهمیت و وسعت پروژه می‌تواند دو یا سه بعدی طراحی شود. مطالعاتی که بر روی مدل ساخته شده صورت می‌گیرد نتایج مطلوبی از نحوه جریان هوا در تونل، بازدهی سیستم تهویه، بررسی نقاط حساس در مواقع اضطراری و ... را به ما نشان می‌دهد. بعد از ساخت مدل هندسی محیط می‌توان یکی از سیستم‌های تهویه را که بیشترین بازدهی را برای پروژه دارند انتخاب کرد و یا این که می‌توان ترکیبی از چند نوع تهویه را بکار برد [۱۵].

## ۲-۶- دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD

دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD عبارت است از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه نظیر واکنش‌های شیمیایی که بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری انجام می‌شود. هدف از تحلیل‌های CFD رسیدن به مطالعات مفهومی طرح‌های جدید، توسعه محصولات، رفع مشکلات

موجود و طراحی مجدد است. CFD روش بسیار توانایی است، به طوری که طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی و غیر صنعتی را در برمی گیرد [۱۶].

معادلات حاکم بر دینامیک سیالات عبارت‌اند از معادله پیوستگی (معادله ۱-۲) که بیانگر بقای جرم است؛ معادله ناور-استوکس<sup>۱</sup> (معادله ۲-۲) که مربوط به سرعت، فشار و دانسته سیال است؛ و در نهایت معادله بقای انرژی (معادله ۳-۲) است که در رابطه با درجه حرارت است. این عبارات تنها در یک سیستم معادلات دیفرانسیلی قابل حل است که در اکثر موارد با روش‌های عددی آن‌ها را بررسی می‌کنند. یکی از این روش‌ها، روش CFD است [۱۷].

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \bar{\nabla} \cdot \bar{V} = 0 \quad (\text{معادله ۱-۲})$$

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = -\bar{\nabla}P + \rho \bar{g} + \mu \nabla^2 \bar{V} \quad (\text{معادله ۲-۲})$$

$$\rho \frac{D\tilde{u}}{Dt} = K_d \nabla^2 T - P \bar{\nabla} \cdot \bar{V} \quad (\text{معادله ۳-۲})$$

معادلات فوق پایه و اساس شروع حل یک مسئله مکانیک سیالاتی می‌باشند. معادلات مکانیک

سیالات به سه روش قابل حل شدن هستند که عبارت‌اند از:

(۱) روش آزمایشگاهی و تجربی

(۲) روش تئوری

(۳) روش CFD

روش آزمایشگاهی نتایج واقعی و کاملاً معتبری را در اختیار ما قرار می‌دهد و از دقت بسیار بالایی برخوردار است. معایب این روش محدودیت محیط آزمایشگاه، محدودیت ابزار ساخت، بالا بودن هزینه ساخت مدل، عدم امکان آزمایش سیالات خطرناک، نیاز به نیرو انسانی زیاد و صرف زمان و هزینه بالا

---

۱- Navier-Stokes

است. در روش تئوری ما از معادله‌های تعریف‌شده ریاضی استفاده می‌کنیم که این یک مزیت محسوب می‌شود؛ اما معایبی هم چون محدودیت معادل سازی، عدم کاربرد مناسب در هندسه‌های پیچیده و وجود مقداری خطا نسبت به نتایج واقعی را دارد.

امروزه نرم‌افزارهای زیادی جهت مطالعه CFD با کاربردهای مختلف برای کاربران این رشته ارائه شده است. از مهم‌ترین این نرم‌افزارها می‌توان به FLUENT، Fidap، Pheonix و Ansys اشاره کرد. نرم‌افزارهای CFD به روش المان محدود<sup>۱</sup> و حجم محدود<sup>۲</sup> در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی عمل می‌کنند [۴].

## ۲-۷- مروری بر کارهای مشابه گذشته

هنگامی که صحبت از تهویه به میان می‌آید ذهن انسان مدرن ناخودآگاه به سمت به‌کارگیری تجهیزات و دستگاه‌هایی برای بهبود کیفیت هوا کشیده می‌شود؛ حال آنکه امروزه مهندسی می‌دانند که الزاماً برای به حرکت درآوردن هوا نیازی به استفاده از تجهیزات تهویه نیست و تهویه طبیعی خود یکی از روش‌های مفید در به چرخه درآوردن هوا است. تاریخچه تهویه تونل‌ها به زمان ساخت اولین دویل تهویه برای تونل ویست‌هیل<sup>۳</sup> در انگلستان یعنی حدود ۲۰۰ سال پیش برمی‌گردد. امروزه شاهد اجرای سیستم‌های تهویه متنوع و گوناگونی در تونل‌ها هستیم که این سیستم‌ها ممکن است از نظر جزئیات اندکی باهم متفاوت باشند اما هدف تمامی آن‌ها یکی است و آن ایجاد محیطی مطبوع و بهبود کیفیت هوا است. اولین استفاده از تهویه مکانیکی در تونل‌های شهرهای لندن و نیویورک و با استفاده از بادبزن‌های ساده صورت گرفت. به‌مرور زمان استفاده از تجهیزات مکانیکی برای به جریان انداختن و کنترل تهویه هوا مورد توجه

---

۱- Finite Element

۲- Volume Element

۳- Westhill Tunnel

قرار گرفت که نتیجه آن ابداع روش‌های متفاوت برای تهویه تونل‌ها بود. در سال ۱۹۲۰ میلادی اولین سیستم تهویه مکانیکی برای تونل هالند<sup>۱</sup> در نیویورک استفاده شد [۱۹].

شکل و ایده کلی سیستم‌های تهویه از گذشته تا به امروز تغییر چندانی نداشته است؛ اما به کارگیری هر یک از روش‌های موجود به مرور زمان با ظهور تکنولوژی‌های نوین بهبود یافته و بهتر شده است. از سوی دیگر انتخاب سیستم تهویه برای تونل‌ها به مرور زمان با افزایش فاکتورهای مؤثر در امر تهویه پیچیده‌تر شده است.

شکل کاربرد و ویژگی هر یک از تونل‌ها آن‌ها را از دیگر متمایز می‌سازد و بالطبع طراحی سیستم تهویه نیز برای هر کدام از تونل‌ها متفاوت است. آنچه مسلم است چه به صورت طبیعی و با کمک عواملی چون اثر پیستونی و چه به کمک تجهیزات تهویه مکانیکی، تمام تونل‌ها نیازمند تهویه هستند. طراحی سیستم تهویه بایستی برای هر دو شرایط عادی و بحرانی با توجه به محدودیت‌های اقتصادی و ساختاری تونل انجام گیرد و از بین گزینه‌های موجود روشی انتخاب شود که مناسب‌ترین عملکرد را داشته باشد [۱۹].

نمونه‌ای از مهم‌ترین کارهای مشابه به موضوع تحقیق که از سال ۲۰۰۰ در داخل و خارج کشور انجام شده و همچنین توضیح مختصری درباره هر کدام از این کارها در جدول ۲-۱ آورده شده است.

---

۱- Holland Tunnel

جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق

منبع	توضیح مختصر	سال	مؤلف
[۲۰]	خط ۴ متروی تهران در مرحله حفاری به دلیل استفاده از ماشین‌هایی مانند لودر، کامیون و بتن ریز، گردوغبار و آلاینده‌های زیادی را تولید می‌کند و این امر ادامه فعالیت را با اشکال مواجه کرده است. در این مقاله با ارائه دو طرح تهویه سعی شده تا مشکلات موجود در زمینه تهویه برطرف شود.	۲۰۰۰	حسن مدنی و حسن بخشنده‌امینه
[۲۱]	در مواقع اضطراری هم چون آتش‌سوزی گسترش دود در تونل مشکلات زیادی را به وجود می‌آورد در این مقاله به بررسی سرعت بحرانی لازم برای دفع دود در تهویه تونل پرداخته شده است. این تحقیق با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون سطح مقطع تونل، توزیع دما و سرعت هوا در تهویه طولی انجام شده است. از شبیه‌سازی CFD برای حل این مسئله استفاده شد.	۲۰۰۰	Y. Wu & M.Z.A. Bakar
[۲۲]	توجه به ایمنی تونل‌ها به دلیل حساسیت بالا در مواقع آتش‌سوزی امری لازم و ضروری است. پیشرفت ابزارهای شبیه‌سازی جدید در حالت سه‌بعدی (CFD) منجر به طراحی‌های استاندارد در امر تهویه شده است. در این تحقیق به بازسازی و نوسازی تهویه تونل مونت‌بلان <sup>۱</sup> پس از آتش‌سوزی فاجعه‌بار در ۲۴ مارس ۱۹۹۹ پرداخته شده است.	۲۰۰۱	Marco Bettelini and atc
[۲۳]	شبیه‌سازی سیستم تهویه و آتش‌سوزی در تأسیسات زیرزمینی با مدل MFIRE در این مقاله بررسی شده است. هدف این مطالعه راه اندازی یک سیستم تهویه اضطراری برای به حداقل رساندن آسیب‌ها و فراهم ساختن یک محیط امن است.	۲۰۰۱	L.H. Cheng and atc
[۲۴]	در این مقاله تونلی از نظر آلاینده‌های گلخانه‌ای بررسی شد و اثر حجم ترافیک و اثر پیستونی ماشین‌ها با روشی ساده و کارآمد مدل شد. نتایج نشان می‌دهد که غلظت مقطعی غیریکنواختی از گازهای گلخانه‌ای در طول تونل وجود دارد که با افزایش فاصله از دهانه ورودی تونل این غلظت افزایش می‌یابد. اثر پیستونی تنها ۹ تا ۲۳ درصد از آلودگی‌ها را کاهش می‌دهد که منجر به تهویه ۲۳ تا ۷۴ درصد تونل می‌شود در نتیجه وجود یک سیستم تهویه مکانیکی لازم است.	۲۰۰۲	K.S. Chen and atc
[۲۵]	در این مقاله به بررسی حالت‌های مختلف آتش‌سوزی و مکان‌های مختلف به وجود آمدن آتش در ایستگاه مترو گونگ‌گوان <sup>۲</sup> تایپه پایتخت کشور تایوان پرداخته شده است. پخش دود در ایستگاه و آتش‌سوزی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مدل شد. در این تحقیق از نرم‌افزار CFX برای مدل‌سازی استفاده شد.	۲۰۰۲	Falin Chen and atc

۱- Mont-Blanc

۲- Gong-Guan subway station

ادامه جدول ۲-۱: پیشینه تحقیق

منبع	توضیح مختصر	سال	مؤلف
[۱۳]	عملکرد سیستم ایمنی تونل برای محافظت در مواقع آتش‌سوزی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه انواع سیستم‌های تهویه تونل و کارایی آن‌ها در هنگام آتش‌سوزی باهم مقایسه شد.	۲۰۰۳	Jojo S.M. Li & W.K. Chow
[۲۶]	در این تحقیق یک ایستگاه مترو از سامانه حمل‌ونقل سریع تاپه شبیه‌سازی شد و تأثیر دود و آتش را در آن بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر وجود یک سیستم تهویه مکانیکی واکنش سریع نیروهای اطفاء حریق در کنترل آتش و دود بسیار مؤثر است.	۲۰۰۳	F. Chen and etc
[۱۴]	تونل‌های طویل با مقاطع بزرگ در حمل‌ونقل بین‌شهری چالش بزرگی برای طراحی سیستم تهویه است. در این مقاله به بررسی سیستم‌ها تهویه مناسب برای تونل‌های طویل پرداخته شده است و در نهایت طراحی سیستم تهویه تونل شهر کالنگ در کشور سنگاپور به طول ۸/۷ کیلومتر با توجه به مواقع اضطراری انجام شد.	۲۰۰۴	Guiian Sin Kwa
[۲۷]	در این مقاله طراحی سیستم تهویه تونل امیرکبیر که به طول بیش از ۲ کیلومتر است انجام شد. با توجه به میزان تردد وسایل از این تونل روش‌های مختلفی همچون تهویه با استفاده از بادبزن سقفی، دوپل میانی و تهویه نیمه عرضی با استفاده از کانال ایرواشر مورد استفاده قرار گرفت و استفاده از بادبزن سقفی به‌طور کامل شرح داده شد.	۲۰۰۵	حسن مدنی و همکاران
[۲۸]	معابر عابر پیاده در ایستگاه‌های مترو به علت حضور مسافران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله یک معبر عابر پیاده در ایستگاه مترو از نظر آسایش حرارتی و کارایی سیستم تهویه با استفاده از CFD شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت.	۲۰۰۶	Kazuhiro Fukuyo
[۳]	در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی CFD طراحی سیستم تهویه مناسب برای ایستگاه‌ها و سکوهاى مترو صورت پذیرفته است.	۲۰۰۶	F.D Yua & Sh.J You
[۲۹]	در این تحقیق پس از شبیه‌سازی‌های عددی تأثیر حرکت قطار در داخل تونل برای ارزیابی نتایج یک مدل از حرکت قطار در تونل در مقیاس آزمایشگاهی طراحی شد. نتایج نشان داد که حرکت قطار و تأثیر پیستونی آن بر قسمت‌های مختلف تونل تأثیر می‌گذارد، این تأثیرات با مدل عددی طراحی‌شده مقایسه و مدل شبیه‌سازی شده ارزیابی شد.	۲۰۰۷	Jung-Yup Kim & Kwang-Yong Kim

ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق

منبع	توضیح مختصر	سال	مؤلف
[۲]	در این تحقیق طراحی سیستم تهویه تونل مترو تهران حدفاصل ایستگاه‌های مولوی و شوش انجام شد. پس از محاسبه میزان گرمای تولیدی در ایستگاه‌ها و تونل‌ها میزان هوای لازم برای تهویه در شرایط عادی $64 \text{ m}^3/\text{sec}$ و در شرایط اضطراری $105 \text{ m}^3/\text{sec}$ محاسبه شد.	۲۰۰۷	حسن مدنی و علی اسدی داود آبادی
[۳۰]	کیفیت هوای ورودی به مترو و ایستگاه‌ها تأثیر مستقیمی بر رضایت مسافران و کاربران دارد به همین خاطر باید همواره کیفیت هوای ورودی به مترو را در نظر داشته باشیم. در ساعات شلوغی مترو کیفیت هوای ورودی جایگاه ویژه‌ای پیدا می‌کند. در این تحقیق به بررسی کیفیت هوای ورودی تونل و ایستگاه‌ها در ساعات شلوغی مترو شهر سنول پایتخت کشور کره پرداخته شده است.	۲۰۰۸	Soon-Bark Kwon and atc
[۱۰]	در این مقاله ضمن بررسی سیستم‌های مختلف تهویه متداول در خطوط ریلی جهان به بحث تهویه در متروها پرداخته و به‌عنوان مطالعه موردی سیستم تهویه محدوده زیرزمینی فاز یک از خط یک مترو تبریز بررسی شده است.	۲۰۰۸	بهرام عباسفانی و عبدالله بابایی
[۳۱]	در این تحقیق آسایش حرارتی در قطارهای خطوط ۱ و ۲ متروی تهران بر اساس محاسبه شاخص RWI مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌ها طی دو دوره، در مهر ۱۳۸۵ و تیر ۱۳۸۶ انجام شده و مقادیر دما، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا، وضعیت سیستم تهویه واگن‌ها در هنگام اندازه‌گیری، میزان ترافیک مسافر، نوع و شماره واگن در ساعات‌های مختلف به‌صورت تصادفی ثبت گردید. میانگین RWI محاسبه شده در واگن‌ها $0/235$ برای مهرماه ۱۳۸۵ و $0/225$ برای تیرماه ۱۳۸۶ بوده است. این نتایج نشان داد که مترو تهران از نظر آسایش حرارتی وضعیت قابل قبولی دارد.	۲۰۰۸	مجید عباسپور و همکاران
[۳۲]	این تحقیق با شبیه‌سازی CFD برای آتش‌سوزی در مترو، شرایط ایمنی در ایستگاه‌های مترو بررسی شده است. در این تحقیق نشان داده شد که در صورت بروز آتش‌سوزی در ایستگاه، قسمت کنترل بلیط تأثیر چشم‌گیری در زمان لازم برای خروج مسافران و حفظ جان آن‌ها دارد.	۲۰۰۹	Jae Seong Roh and etc
[۳۳]	بررسی و تعیین محل شفت‌های تهویه در تونل مترو موضوع مورد بحث است. این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار CFX انجام شد و مکان‌های مختلف ایجاد شفت مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نشان داده شد که دریچه‌ها و شفت‌هایی که در نزدیک ایستگاه قرار دارند بیشترین کارایی را در امر تهویه دارند.	۲۰۰۹	Jung-Yup Kim & Kwang-Yong Kim

ادامه جدول ۲-۱: پیشینه تحقیق

منبع	توضیح مختصر	سال	مؤلف
[۳۴]	مدل CFD برای خط ۴ مترو پکن انجام شد و سیستم تهویه طولی این مترو در حالات وجود گرما و دود ارزیابی شد. در نهایت با استفاده از مدل ساخته شده به بررسی سرعت بحرانی لازم پرداخته شد.	۲۰۰۹	Yang Hui and etc
[۳۵]	با استفاده از مدل CFD به بررسی تأثیر حرکت پیستونی قطار و در نتیجه تهویه طبیعی پرداخته شد. نتایج نشان داد که تهویه طبیعی جوابگوی هوای لازم برای ایستگاه است و در صورتی که از دوپل در ابتدا و انتهای ایستگاه استفاده شود سرعت هوا به مقدار مطلوبی می‌رسد.	۲۰۰۹	Li Jia and etc
[۳۶]	این محققین سیستم تهویه اضطراری ایستگاه فردوسی مترو تهران را که مربوط به خط ۴ است را با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی مورد بررسی قرار دادند؛ این شبیه‌سازی‌ها در دو حالت دائم و غیر دائم مورد بررسی قرار گرفت و نتایج و نمودارهای مربوط به آن ثبت شد. نتایج نشان داد که استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند تا حد زیادی به طراحی‌های سناریوی آتش‌سوزی کمک کند؛ همچنین سیستم تهویه قادر است تا دود را به خوبی کنترل کند	۲۰۱۰	رضا مداحیان و همکاران
[۳۷]	در این مقاله طراحی سیستم تهویه یک تونل جاده‌ای درون‌شهری به طول ۲۵۰۰ متر و در ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح دریا انجام شد. سیستم تهویه طولی مناسب‌ترین سیستم تهویه این تونل برآورد شد. برای تهویه این تونل ۸۲ عدد جت فن 140JTS شرکت Woods در ۴۱ ردیف به صورت دوتایی و با فاصله‌های مساوی از هم نصب شد.	۲۰۱۰	سیدمحمد هاشمی و همکاران
[۳۸]	از مشکلات عمده‌ای که در معادن زغال‌سنگ جبهه کار بلند وجود دارد تولید گردوغبار در هنگام کار شیرر و خروج گاز از منطقه تخریب است. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی CFD به حل مشکلات نامبرده و ارائه راه‌کارهایی جهت بهبود این مشکلات پرداخته شده است.	۲۰۱۰	Ting Ren & Rao Balusu
[۳۹]	کوو <sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ تهویه طولی را در یک تونل شیب‌دار مدل کردند، برای بررسی شیب تونل و تأثیر آن بر پخش دود از یک مدل آزمایشگاهی به طول ۲ متر با قابلیت تغییر شیب استفاده شد.	۲۰۱۰	W.K. Chow and etc
[۱۷]	در این تحقیق با استفاده از CFD به بررسی کیفیت تهویه یک تونل که در حال حفر می‌باشد پرداخته شده است. شبیه‌سازی در حالت سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار ICEM-CFD انجام شده است.	۲۰۱۱	Isidro Diego and atc

۱- Chow, W.K



ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق

منبع	توضیح مختصر	سال	مؤلف
[۴۰]	حمیدرضا علیزاده طراحی سیستم تهویه تونل دوطبقه بزرگراه شهید صیاد شیرازی را به منظور تأمین هوای تازه و رقیق‌سازی آلاینده‌ها انجام داد. در این تحقیق پس از جانمایی مناسب چاه‌های تهویه برای هر یک از طبقات با مشخص کردن مکان و نوع بادبزن اصلی طراحی را انجام دادند.	۲۰۱۱	حمیدرضا علیزاده
[۴۱]	در این مطالعه به بررسی نصب پرده هوا برای جداسازی دو محیط مجاور هم پرداخته شده است. شبیه‌سازی با استفاده از مدل CFD و به کمک نرم‌افزار ANSYS CFX انجام شده است.	۲۰۱۱	Makhsuda Juraeva and etc
[۴۲]	در سال ۲۰۱۱ بین‌بین <sup>۱</sup> یک آتش‌سوزی را با استفاده از دو نرم‌افزار FLUENT و FDS مدل‌سازی کرد و نتایج این دو نرم‌افزار را مورد ارزیابی قرار داد. ارزیابی نتایج این دو نرم‌افزار در ایستگاه مترو زافانگ تیانجین <sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. از مقایسه نتایج برداشت شد که شبیه‌سازی آتش و دود در FLUENT ساده‌تر از FDS است. هنگامی که آتش‌سوزی در وسط قطار رخ می‌دهد در زمان‌های ۱۲۰ و ۳۶۰ ثانیه نتایج FDS واقعی‌تر است.	۲۰۱۱	Wang Binbin
[۴۳]	در این مطالعه جریان دود ناشی از آتش‌سوزی در مترو و ایستگاه شبیه‌سازی و مورد آزمایش قرار گرفت. آتش بررسی شده به شدت 10MW بود و حالت-های مختلف تهویه و عملکرد سیستم ایمنی ارزیابی شد. این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT انجام شد.	۲۰۱۱	Hong-de Wang and atc
[۱۵]	برای مقابله با حالات اضطراری مختلف سیستم تهویه مترو باید قادر به حل مشکل باشد. در این تحقیق تجزیه و تحلیل عددی عملکرد سیستم تهویه برای استراتژی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.	۲۰۱۲	Huang Yuandong and etc
[۴۴]	بهزاد نیکنام و همکاران طراحی سیستم تهویه تونل قلاجه را حین آتش‌سوزی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT مدل کردند. این مدل‌سازی سیستم تهویه طولی را در حین آتش‌سوزی به مدت زمان ۹۰۰ ثانیه ارزیابی کرد؛ سیستم تهویه طولی برای کنترل آتش و دود ناشی از منبع حجمی گرما به اندازه 25MW نیاز به دو ردیف بادبزن چهارقلو در داخل تونل و بالادست آتش دارد. نتایج با استفاده از نمودار هیدروکربن هیدروکربن اصلاح شده اعتبار سنجی شد.	۲۰۱۲	بهزاد نیکنام و همکاران

۱- Binbin, Wang

۲- Tianjin Xiawafang Subway Station

ادامه جدول ۲-۱: پیشینه تحقیق

منبع	توضیح مختصر	سال	مؤلف
[۴۵]	طراحی سیستم تهویه برای تونل شهری نیایش با استفاده از روش‌های نیمه تجربی ارائه شد. طراحی با توجه به استاندارد پیارک <sup>۱</sup> برای کنترل آلودگی‌ها انجام شد. نتیجه این پژوهش انتخاب سیستم تهویه طولی به‌عنوان کارآمدترین سیستم بود و تعداد جت فن‌ها در تونل‌های شمالی، جنوبی و کردستان به ترتیب ۱۰۱، ۴۶ و ۴ دستگاه برآورد شد.	۲۰۱۲	سینا شهبازی و همکاران
[۱۱]	یاسر مصری و همکاران به بررسی تهویه تونل‌های مترو جهت انتخاب تجهیزات و مقابله با خطر آتش، در تونل خط یک مترو مشهد پرداختند. برای تحلیل عددی از نرم‌افزار FLUENT استفاده شد و درنهایت حالت بهینه دستگاه‌ها برای کل تونل به دست آمد و نتایج با تجهیزات موجود مقایسه شده است. روش اعتبار سنجی بر اساس استانداردهای موجود در تونل‌های مترو می‌باشد.	۲۰۱۲	یاسر مصری و همکاران
[۴۶]	طراحی سیستم تهویه تونل کوهسار شمالی حین آتش‌سوزی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT انجام شد و نتایج این مدل با استفاده از نمودار هیدروکربن هیدروکربن اصلاح‌شده اعتبار سنجی شد.	۲۰۱۲	بهزاد نیکنام و همکاران
[۴۷]	برای بهینه‌سازی شرایط کاری در جبهه کارها معدنی شناخت رفتار گاز متان در حالت سه‌بعدی بسیار ضروری است. در این تحقیق برای بررسی حرکت گاز متان از شبیه‌سازی CFD استفاده شده است. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد رابطه مستقیمی بین جریان بازگشتی گازهای خروجی و درصد تجمع گاز متان که باید از جبهه کار خارج گردد وجود دارد.	۲۰۱۲	حسن مدنی و بهزاد نیکنام
[۴۸]	در این تحقیق شبیه‌سازی آلودگی در تونل به دو روش CFD و نیمه تجربی (استاندارد پیارک) انجام شد. درنهایت روش تهویه طولی انتخاب گردید و مکان بهینه قرارگیری جت فن‌ها مشخص شد.	۲۰۱۲	سینا شهبازی و قاسم حیدری نژاد
[۴۹]	گاو <sup>۲</sup> و همکارانش یک ایستگاه بزرگ و شلوغ مترو را شبیه‌سازی کردند و این ایستگاه را در مواقع آتش‌سوزی با استفاده از سیستم‌های ترکیبی تهویه مورد بررسی قرار دادند. سیستم‌های تهویه ترکیبی و مکانیکی معمولی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دریچه‌ای که در سقف ایستگاه وجود دارد (یک دریچه به ابعاد ۳ متر در ۳ متر) تأثیر مستقیمی بر تهویه دارد. با افزایش ابعاد دریچه میزان غلظت CO <sub>2</sub> در ایستگاه کاهش می‌دهد.	۲۰۱۲	Ran Gao and etc

۱- PIARC (Permanent International Association of Road Congresses)

۲- Gao, Ran

ادامه جدول ۱-۲: پیشینه تحقیق

منبع	توضیح مختصر	سال	مؤلف
[۵۰]	آتش‌سوزی در یک ایستگاه مترو می‌تواند خسارات زیادی به بار بیاورد که در این مورد پخش دود در ایستگاه مهم‌ترین مشکل در امر تهویه است. در این تحقیق برآورد گسترش دود در یک ایستگاه بزرگ مترو برای شش موقعیت مختلف آتش‌سوزی ارزیابی شد.	۲۰۱۲	Ran Gao and etc
[۵۱]	در این مطالعه به بررسی و معرفی منابع حرارتی خطوط مترو پرداخته شد. پس از محاسبات لازم برای اندازه‌گیری منابع حرارتی مشخص شد که بیش از نیمی از گرمای تولیدی در خطوط مترو ناشی از فرایند ترمز گیری است.	۲۰۱۳	سیدحامد ادیبی و محرم جعفری
[۵۲]	در این تحقیق چگونگی عملکرد سیستم تهویه یکی از تونل‌های خط ۷ مترو تهران در شرایط بروز آتش‌سوزی در قطار با استفاده از CFD و به‌صورت زمانمند مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی از نظر چگونگی پخش دود و محصولات سمی آن و تخلیه مسافران در شرایط عادی اهمیت دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که سیستم تهویه طراحی شده می‌تواند از بازگشت لایه دود به بالادست ناحیه آتش جلوگیری کند.	۲۰۱۳	علیرضا مندان و همکاران
[۵۳]	لو <sup>۱</sup> و همکاران با ساخت یک مدل آزمایشگاهی از یک ایستگاه مترو و شبیه‌سازی سه‌بعدی این محیط با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی حالت‌های مناسب تهویه مترو و ایستگاه در حین آتش‌سوزی پرداختند. نتایج این آزمایش با استفاده از مدل ساخته‌شده اعتبار سنجی شد. این تحقیق نشان داد که در مواقع دود و آتش کم تهویه طبیعی جوابگوی ایستگاه می‌باشد و با افزایش دود نیاز به باز کردن دریچه‌های بیشتری از تهویه است.	۲۰۱۴	Na Luo and etc
[۱]	در این مطالعه به طراحی و شبیه‌سازی عددی سیستم تهویه مترو تبریز با استفاده از CFD و نرم‌افزار ANSYS FLUENT پرداخته شد. این شبیه‌سازی نشان داد که سیستم تهویه مترو به‌خوبی قادر به مقابله با گرمای تولید شده است و همچنین مشخص شد که نزدیک راه‌پله‌های خروجی ایستگاه نامساعدترین ناحیه برای مسافران است و این قسمت بیشترین تغییرات دما و سرعت هوا را دارد.	۲۰۱۴	سیدحامد ادیبی و محرم جعفری
[۵۴]	این مطالعه به بررسی چهار حالت برای تهویه بخشی از یک معدن سنگ‌آهک پرداخته است که این حالات مربوط به باز یا بسته بودن در تهویه و خاموش و روشن بودن فن کمکی است. شبیه‌سازی تهویه با استفاده از مدل CFD انجام شد و درنهایت این آزمایش با استفاده از گاز شاخص ارزیابی شد.	۲۰۱۵	Guang Xu and etc

۱- Luo, Na

منبع	توضیح مختصر	سال	مؤلف
[۵۵]	در این مقاله سرعت بحرانی تهویه و پارامترهای تأثیرگذار بر روی آن در تونل-های مترو بررسی شد. از FDS که یک شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی است استفاده شده است. در این مدل اثر شکل منبع آتش، وجود قطار در تونل، شکل هندسی تونل و شیب تونل بر روی سرعت بحرانی تهویه بررسی شد.	۲۰۱۶	مسعود مونسان و همکاران
[۵۶]	در این تحقیق به بررسی گسترش دود در ایستگاه مترو پرداخته شده است. این شبیه‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم‌افزار FDS انجام شده است. برای بررسی شبیه‌سازی ۶ مطالعه موردی در فاصله‌های ۱۵۰ متری از هم در طول تونل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد در کنترل و تخلیه دود دویل‌های میانی تونل و عملکرد فن‌های اصلی تأثیر زیادی دارند.	۲۰۱۶	Mahmoud A. Ahmed and etc

## ۲-۹- جمع‌بندی

در داخل مترو و ایستگاه‌های آن شدت جریان لازم برای برقراری شرایط آسایش حرارتی و تهویه مطبوع قابل محاسبه است. پس از به دست آوردن شدت جریان لازم در ایستگاه‌ها و تونل‌ها و با توجه به هوای لازم برای هر قسمت سیستم تهویه موردنیاز طراحی می‌شود. اگر سیستم تهویه طبیعی قادر به تهویه مترو باشد بنابراین بدون هیچ هزینه‌ای تهویه انجام می‌شود؛ و اگر شدت جریان ناشی از تهویه طبیعی کمتر از مقدار محاسبه شده برای مترو باشد باید یک سیستم تهویه مکانیکی کارآمد را طراحی کرد. انتخاب سیستم تهویه مکانیکی با توجه به پارامترهایی همچون ابعاد تونل، طول تونل، ساعات شلوغی مترو، یک یا دوطرفه بودن مسیر مترو، تعداد دویل‌های قابل حفر و ... صورت می‌پذیرد. امروزه بیشتر از سیستم‌های تهویه ترکیبی در مترو استفاده می‌شود.

با شبیه‌سازی CFD می‌توان سیستم تهویه را در شرایط عادی و اضطراری موردبررسی قرارداد. درنهایت آن سیستم تهویه‌ای انتخاب می‌شود که بالاترین قابلیت را در دو حالت عادی و اضطراری داشته باشد و همچنین از نظر هزینه ساخت و عملیات نگهداری اقتصادی باشد.



فصل سوم

تهیه مطبوع در مترو

افزایش جمعیت شهرها تراکم ساختمان‌ها و استفاده حداکثری از محیط‌های شهری باعث شده است تا سیستم‌های حرارت مرکزی و تهویه مطبوع برای تنظیم هوای داخل ساختمان‌ها گسترش زیادی پیدا کند. همچنین، با پیشرفت فن‌آوری و نیاز صنایع و مراکز تحقیقاتی به فضاهای پاک و با کنترل شدید شرایط محیطی توجه به طراحی سیستم‌های پیشرفته تهویه مطبوع با مصرف انرژی بهینه و تولید کمترین مقدار صدا و ارتعاش افزایش پیدا کرده است. از آنجاکه محیط بسته و محدود بخش مهمی از محیط زندگی، محل کار و حتی وسیله نقلیه و جایابی انسان امروز را تشکیل می‌دهد هر نارسایی در تأمین هوای مناسب داخل می‌تواند اثر سوء بر رفتارهای روانی، شرایط جسمانی و بازده فکری و کاری فرد داشته باشد. نقش تأسیسات در بهره‌برداری از ساختمان آن قدر مهم است که بعضی آن را قلب ساختمان می‌نامند [۵۷].

مهم‌ترین بخش تأسیسات مکانیکی در ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو سیستم تهویه است. تأمین هوای موردنیاز ایستگاه و تونل به وسیله این سیستم‌های تأسیساتی امکان‌پذیر است. با توجه به محل استقرار هر ایستگاه و نیاز به هوای موردنیاز، گنجایش و سیستم این تأسیسات متغیر خواهد بود. دو نوع فضای تأسیساتی در هر ایستگاه وجود دارد، یک نوع آن تهویه ایستگاه‌ها و تونل‌ها را بر عهده دارد و دیگری تأمین‌کننده گرمایش و سرمایش ساختمان‌های اداری، تجاری و خدماتی است [۵۸].

در این فصل به معرفی تهویه مطبوع و پارامترهای مؤثر در طراحی سیستم تهویه مترو می‌پردازیم. آنچه در این فصل آمده است کمک می‌کند تا گزینش مناسبی برای سیستم تهویه مطبوع مترو داشته باشیم.

## ۳-۲- تهویه مطبوع

کنترل دما، رطوبت، درجه خلوص و سرعت حرکت هوا در یک ساختمان را تهویه مطبوع می‌گویند. تهویه مطبوع برای یک یا دو منظور زیر انجام می‌شود [۵۷]:

- تأمین آسایش ساکنان ساختمان.
- ایجاد شرایطی که برای کار تحقیقاتی، تأمین شرایط بهداشتی، تولید محصول و یا نگهداری محصول موردنیاز است.

به‌منظور کنترل و ایجاد شرایط محیطی مناسب سیستم تهویه مترو در سه حالت کار عادی، کار متراکم (اختلال در کار عادی) و تهویه اضطراری طراحی می‌شود. در دو حالت کار عادی و متراکم سیستم تهویه وظیفه هوا رسانی، خنک کردن و تخلیه حرارت از تونل‌ها و ایستگاه‌ها را دارد. در حالت اضطراری که مربوط به زمان آتش‌سوزی در مترو است؛ سیستم تهویه باید قادر به کنترل حریق و تخلیه دود حاصل از حریق باشد [۵۹].

تهویه مطبوع به‌منظور کنترل رطوبت و درجه حرارت هوای ورودی انجام می‌شود و شامل موارد زیر است [۶۰]:

الف) سرما سازی

ب) گرما سازی

ج) مرطوب‌سازی

د) رطوبت‌زدایی

ه) خوشبو سازی

و) فیلتر کردن



در مناطقی که هوای معتدلی دارند تهویه به‌تنهایی کافی است اما در مناطقی که هوای گرم‌تر و یا سردتر از حد معتدل دارند روش‌های گرما سازی یا سرما سازی باید انجام شود. مناسب‌ترین هوا برای تهویه مطبوع هوای نمناک یا هوای طبیعی است که مخلوطی از هوای خشک و بخار آب است. در تهویه مطبوع بخار آب موجود در هوا بایستی مقدار ۰/۱ تا ۴ درصد حجمی هوا را داشته باشد. اگر در مناطقی رطوبت هوا مقداری بیشتر و یا کمتر از این مقدار باشد بایستی از روش‌های رطوبت‌زدایی و یا مرطوب‌سازی استفاده شود [۶۰].

### ۳-۳- وظایف و اهداف سیستم تهویه مطبوع

زیباترین و گران‌بهارترین ساختمان‌ها در صورتی که فاقد سیستم تهویه مطبوع باشند قابل استفاده نخواهند بود. گرمایش و سرمایش هوا متناسب با فصل، عمده‌ترین وظیفه یک سیستم تهویه مطبوع بوده و بقیه وظایف در مراتب بعدی اهمیت قرار می‌گیرد [۶۱].

برای داشتن یک تهویه مطبوع یا هوای مشروط<sup>۱</sup> شرایط زیر را باید در نظر گرفت [۵۷]:

- دمای تهویه مطبوع مناسب با فضای موردنظر باشد.
- رطوبت تهویه با محیط سازگار و مناسب باشد.
- با توجه به کاربرد آن از نظر تازه بودن و خلوص در شرایط مناسب باشد.
- جهت حرکت و سرعت آن مناسب و مطابق با شرایط کار باشد.

تأمین شرایط آسایش حرارتی برای مسافران از اهم وظایف سیستم تهویه در مترو است و برای رسیدن به این مهم باید چهار هدف را در نظر گرفت [۱۱].

✓ تأمین هوای تازه برای نیازهای فیزیولوژیکی مسافران.

---

۱- Air Condition

- ✓ گرفتن گرمای بدن و گازهای مضر مثل کربن‌دی‌اکسیدی.
- ✓ جلوگیری از تجمع بخار آب تولیدشده توسط تعریق و آب نفوذی از ایرواشر.
- ✓ خارج کردن مقدار زیادی از حرارت ناشی از کارکرد موتور قطار، گرمای زمین، واحد ترمز، روشنایی و گرمای حاصل از کارکرد فن و ایرواشر.

### ۳-۴- هوا و آسایش انسان

اولین سیستم حمل‌ونقل مترو ۱۵۰ سال پیش و در شهر لندن شروع به فعالیت کرد و امروزه بیش از یک‌صد میلیون نفر در سراسر جهان از مترو برای سفرهای داخل شهری استفاده می‌کنند. سیستم مترو برای کاهش حجم ترافیک سطحی شهر احداث می‌شود بنابراین در اکثر موارد متروها در زیر زمین ایجاد می‌شوند. باوجود مزایای آشکاری که مترو دارد، تأمین هوای باکیفیت مناسب برای حجم عظیمی از مسافران و کارکنان یک مشکل محسوب می‌شود و شناخت شرایط آسایش حرارتی به حل این مشکل کمک می‌کند [۶۲].

اساس آسایش حرارتی توسط سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع یک ساختمان کنترل می‌شود؛ هرچند طرح معماری یک ساختمان تأثیر زیادی بر آسایش حرارتی دارد. آسایش حرارتی برای افراد یک وضعیت ذهنی است که رضایت از محیط فعلی را بیان می‌کند. وقتی انسان داخل یک محیط قرار بگیرد، گرم و یا سرد شدن را احساس خواهد کرد در نتیجه عواملی را مؤثر در آسایش خود می‌داند که شامل سه بخش می‌باشند [۶۳]:

- شخصی: میزان فعالیت و لباس افراد.
- مشخصه‌های فردی: انتظارات افراد.
- شرایط محیطی و تأثیرات معماری: دمای هوا، دمای تشعشعی، رطوبت و سرعت هوا.

یک مهندس طراح سیستم تهویه باید برای طراحی مناسب عوامل مربوط به شرایط محیطی را در نظر داشته باشد. با توجه به این که متابولیسم بدن افراد مختلف متفاوت است در نتیجه نمی توان برای هر فرد آسایش حرارتی خاص خود را فراهم کرد از این رو بسته به نوع فعالیت انسان در منابع مختلف استانداردهایی در مورد تهویه برای هر فرد بیان شده است که به برخی از مهم ترین آن ها اشاره می شود. در بسیاری از شهرها و شهرداری ها، مقدار تهویه در ساختمان های مختلف به صورت قانون می باشد که در جدول ۱-۳ درج شده است [۶۴].

جدول ۱-۳: برخی از استانداردهای توسعه شده تهویه برای فضاهای گوناگون [۶۴]

cfm <sup>۱</sup> برای هر شخص		مقدار دود	فضا یا محل
حدافل	بهینه		
۱۰	۱۵	کمی	بانک
۳۵	۴۰	سنگین	کافه
۱۰	۱۵	کمی	اداره ها
۱۵	۲۵	کمی	عمومی
۲۵	۳۰	قابل توجه	خصوصی
۷	۱۰	گهگاه	مسکونی
۱۵	۲۰	قابل توجه	رستوران
۱۰	۱۵	بسیار اندک	فروشگاه

بر اساس مقررات ایمنی در اتحاد شوروی که در کشور ما نیز به آن عمل می شود، برای هر نفر از

کارکنان معدن بایستی ۶ مترمکعب هوا در دقیقه در نظر گرفته شود [۶۰].

تعداد افرادی که از مترو استفاده می کنند همواره متغیر است، بنابراین استاندارد جهانی خاصی

جهت میزان هوای لازم برای هر فرد وجود ندارد. استانداردهای مربوط به کیفیت هوا<sup>۲</sup> ASHRAE و

۱- Cubic Feet per Minute

۲- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

ANSI<sup>۱</sup> که برای تهویه تمام فضاهای داخلی و بسته قابل استفاده هستند در مترو نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته ناگفته نماند که برخی از متروها برای هر فرد مقدار هوای لازم را تعیین می‌کنند. در تحقیقات انجام شده توسط مترو مشهد و شرکت زیترون<sup>۲</sup> اسپانیا مقدار هوای لازم برای هر منطقه از ایستگاه محاسبه شده است و نتایج آن در جدول ۳-۲ آورده شده است [۶۵ و ۶۶].

جدول ۳-۲: میزان هوای لازم برای هر فرد در قسمت‌های مختلف مترو مشهد [۶۶].

قسمت مورد نظر	میزان هوای لازم
سکو و تراز کنترل بلیط	۴۰ m <sup>3</sup> /h/pers
نواحی مربوط به کارکنان	۴۰ m <sup>3</sup> /h/pers
مخابرات و اتاق سیگنالی‌نگ	۱۰٪ هوای تازه
مناطق تجاری و تفریحی	۲۰٪ هوای تازه

### ۳-۵- اجزای تهویه مترو

مترو از دو بخش اصلی ایستگاه‌ها و تونل‌ها تشکیل شده است. ایستگاه‌های مترو به دلیل این که افراد زیادی از آن استفاده می‌کنند و برای استفاده عموم در نظر گرفته شده‌اند از نظر تهویه حساس‌تر هستند و تونل‌ها مخصوص عبور قطار هستند و حضور افراد عادی در آن‌ها ممنوع است [۶۵].

سیستم تهویه خوب بایستی قادر باشد تا هوای لازم و باکیفیت مناسب را به تمام بخش‌های مترو هوا رسانی کند. معیارهای مربوط به کیفیت هوا در داخل مترو به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند [۶۷]:

(۱) معیارهای مربوط به کیفیت هوا در حالت عادی

(۲) معیارهای مربوط به کیفیت هوا در حالت اضطراری

۱- American national standard institute

۲- Zitron

در حالت عادی سیستم تهویه باید معیارهایی همچون آسایش حرارتی، کیفیت هوا، سرعت مناسب هوا و تغییرات فشار مطلوب را داشته باشد. در حالت اضطراری که مربوط به آتش‌سوزی در مترو است سیستم تهویه باید سعی کند که علاوه بر کنترل تمام معیارهای حالت عادی دمای هوا و دود ناشی از آتش‌سوزی را به‌گونه‌ای هدایت و کنترل کند تا عملیات نجات و خروج مسافران به بهترین شکل انجام گیرد [۶۷].

سیستم تهویه در مترو جهت ایجاد کیفیت هوا شامل موارد زیر است [۵۹]:

- باد بزن‌های محوری<sup>۱</sup>
- ایرواشر<sup>۲</sup>
- صدا خفه‌کن<sup>۳</sup>
- فیلتر هوا<sup>۴</sup>

### ۳-۵-۱- بادبزن‌های محوری

نحوه کار بادبزن‌های محوری به این صورت است که هوا از طریق مجرای که در امتداد محور دستگاه قرار دارد وارد شده و به چرخ دوار که حاوی پره‌ها است می‌رسد؛ در این قسمت هوا دوران کرده و بعد از گذشتن از پره‌های هادی وارد مجرای واگرا می‌شود. شکل ۱-۳ نمونه‌ای از این بادبزن را نشان می‌دهد. از مشخصات این نوع بادبزن این است که می‌توان زاویه پره‌ها و در نتیجه شدت جریان و فشار هوا را تغییر داد [۶۰].

---

۱- Axial Flow Fan

۲- Air Washer

۳- Silencers

۴- Air Filter



شکل ۳-۱: بادبزن محوری [۶۸].

بادبزن‌های محوری به دو صورت یک جهته و معکوس شونده ساخته می‌شوند. بادبزن‌های یک جهته برای تونل‌های یک‌طرفه پیشنهاد می‌شود و فن‌های معکوس شونده نه تنها در تونل‌ها یک طرفه کاربرد دارند بلکه به خاطر مسائل ایمنی و طراحی‌های مربوط به زمان آتش‌سوزی در تمام تونل‌ها بکار برده می‌شوند [۶۸].

### ۳-۵-۲- ایرواشر

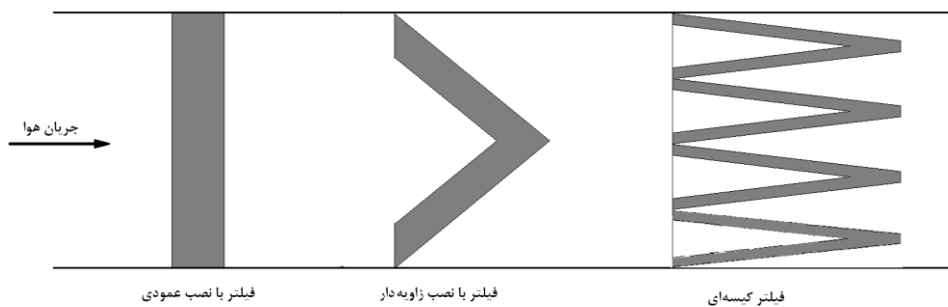
ایرواشر در سیستم تهویه مترو برای خنک کردن هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته بخشی از گردوغبار موجود در هوا نیز در عبور از این دستگاه دفع می‌شود، بدین نحو که هوای گرم با رطوبت کم به آن وارد می‌شود و پس از عبور از صفحه‌های سوراخ‌دار هادی هوا و پس از قطره‌گیری هوای خنک به ایستگاه یا تونل دمیده می‌شود. سیستم ایرواشر می‌تواند رطوبت هوا را تا ۹۰ درصد افزایش دهد. ایرواشر در مواقع اضطراری باید کنار گذاشته شود [۵۹].

### ۳-۵-۳- صدا خفه کن

فن‌های تهویه بسته به قدرت و توانی که دارند ممکن است از خود صداهایی به صورت گسترده در فرکانس‌های ۶۳ هرتز تا ۸۰۰۰ تولید کنند. بر طبق استانداردهای موجود در محدوده‌ای که انسان زندگی می‌کند و مکان‌های عمومی صدا نباید از ۵۵ تا ۸۵ دسی‌بل بیشتر باشد. بنابراین برای کنترل آلودگی صوتی مربوط به فن‌ها تهویه و مخصوصاً فن‌هایی که نزدیک ایستگاه نصب می‌شوند باید از صدا خفه کن استفاده شود. انتخاب صدا خفه کن باید محاسبه شده و دقیق باشد به گونه‌ای که افت فشار نبایستی از مقدار مشخصی بیشتر شود به عنوان مثال در مترو تهران افت فشار نبایستی از ۸۰ پاسکال تجاوز کند بنابراین با توجه به این ویژگی از صدا خفا کن مناسب استفاده شده است [۵۹].

### ۳-۵-۴- فیلتر هوا

همان‌طور که قبلاً گفته شد سیستم تهویه باید قادر باشد هوایی باکیفیت و بدون آلوده‌کننده‌ها را برای محیط موردنظر فراهم کند. آلوده‌کننده‌های هوا همان اجزای ناخواسته موجود در هوا هستند که باعث کاهش کیفیت قابل قبول هوا می‌شوند. تعداد و تنوع این آلوده‌کننده‌ها زیاد است و بعضی از آن‌ها از بیرون به داخل فضای مطبوع آورده می‌شوند و برخی دیگر داخل خود این فضاها تولید می‌شوند. استفاده از فیلتر هوا کمک می‌کند تا آلودگی‌های مضر را با توجه به کیفیت و نوع فیلتر به حداقل برسانیم. نمونه‌ای از نحوه استفاده از فیلتر هوا در شکل ۳-۲ آورده شده است [۶۳].



شکل ۳-۲: انواع نصب فیلتر

استفاده از فیلتر هوا باعث افت فشار در جران هوا می‌شود بنابراین طبق استاندارد ASHRAE نباید افت فشار در صورت استفاده از فیلتر از ۲۰۰ پاسکال تجاوز کند. همچنین همواره باید قبل از این که ظرفیت نگهداری فیلتر به حالت اشباع برسد نسبت به تعویض و یا تعمیر آن اقدام نمود. در مواردی که جریان فن معکوس می‌شود و هدف کنترل شرایط اضطراری آتش و دود است فیلتر هوا باید از سیستم کنار گذاشته شود [۵۹].

### ۳-۶- بار حرارتی مترو

طراحی و محاسبه سیستم حرارتی و تهویه ساختمان بر پایه‌ی بار حرارتی آن انجام می‌شود. بار حرارتی مقدار گرمایی است که یک ساختمان در واحد زمان (معمولاً یک ساعت) از دست می‌دهد. محاسبات دقیق مربوط به بار حرارتی به مهندس طراح کمک می‌کند تا از این بار حرارتی به نحو احسن استفاده کند؛ به‌عنوان مثال در فصل زمستان می‌توان مقداری از بار حرارتی لازم برای ساختمان را از این منابع حرارتی تأمین کرد [۵۷].

فضای مورد تهویه دائماً انرژی جذب و یا دفع می‌کند. در صورتی که دمای فضایی معین برای مدتی نسبتاً ثابت باقی بماند، دلیل آن عدم جذب یا دفع گرما از آن محیط نیست. دمای پایا در آن فضا منحصرأ بدین مفهوم است که فضای مذکور باهمان سرعتی که از همه منابع گرما جذب می‌کند، گرمای خود را نیز دفع می‌کند [۶۸].

در ساختمان‌ها گرما به روش‌های زیر تولید و یا وارد محیط می‌شوند [۶۴]:

- انتقال گرما از طریق خود ساختمان به‌صورت‌های رسانش، همرفت و تابش.
- گرمای ورودی به فضای مسکونی در نتیجه تابش انرژی خورشیدی از پنجره‌ها یا سایر اجزای شفاف یا نیمه شفاف.



۳) گرمای ورود به فضای مسکونی از راه تهویه یا نفوذ هوای بیرون.

۴) گرمای محسوسی که حاضران و شاغلان در ساختمان تولید می کنند.

۵) گرمای محسوسی که منابع روشنایی، وسایل و دستگاهها، موتورها و نظایر آنها تولید می کنند.

۶) گرمای محسوسی که از مواد و محصولات وارد شده به فضای مورد تهویه استخراج می شود.

در داخل مترو بارهای حرارتی زیادی ایجاد می شود که این بارها را می توان به دو گروه کلی زیر

تقسیم کرد [۶۵]:

- بار حرارتی که به صورت ثابت ایجاد می گردد
- بار حرارتی حاصل از حرکت دینامیکی قطار

### ۳-۶-۱- بارهای حرارتی ثابت در مترو

بارهای حرارتی ثابت به منابع تولید حرارتی گفته می شود که روند تولید گرما در آنها ثابت است و باگذشت زمان تغییرات چندانی نمی کند. این منابع در مترو می تواند شامل تجهیزات و مواد به شرح زیر

باشد [۶۵]:

- کابل های برق داخل تونل و ایستگاهها
- چراغ های مربوط به روشنایی تونل و ایستگاهها
- کابل های برق رسانی به قطار
- حرارت خروجی از دستگاه های مربوط به تهویه مطبوع و تهویه واگن ها
- حرارت خروجی از کمپرسورهای واگن ها
- حرارتی ناشی از اصطکاک قطار با ریل و با هوای محیط

• حرارت حاصله از مسافران

انرژی حرارتی ایجادشده از منابع یادشده بستگی به نوع تجهیزات بکار برده در مترو، مسافری و نوع قطار می‌تواند مقداری تا حدود ۵۰۰ کیلووات را داشته باشد. در ادامه به معرفی برخی از مهم‌ترین این منابع حرارتی می‌پردازیم [۶۵].

۳-۶-۱-۱- بار حرارتی ناشی از افراد

بار ناشی از افراد اگرچه در بسیاری از تأسیسات تهویه مطبوع، منازل و یا ساختمان‌های اداری کم‌اهمیت و یا بی‌اهمیت محسوب می‌شود ولی در مورد مترو به دلیل استفاده جمعیت زیادی از آن بار اهمیت پیدا می‌کند [۶۴].

مقدار گرمایی که مردم به محیط می‌دهند به اندازه‌های فیزیکی و فعالیت عضلانی آن‌ها بستگی دارد. مقدار گرمایی که بدن یک فرد بزرگسال در فعالیت‌های مختلف با محیط خارج مبادله می‌کند در جدول ۳-۳ آمده است [۵۷].

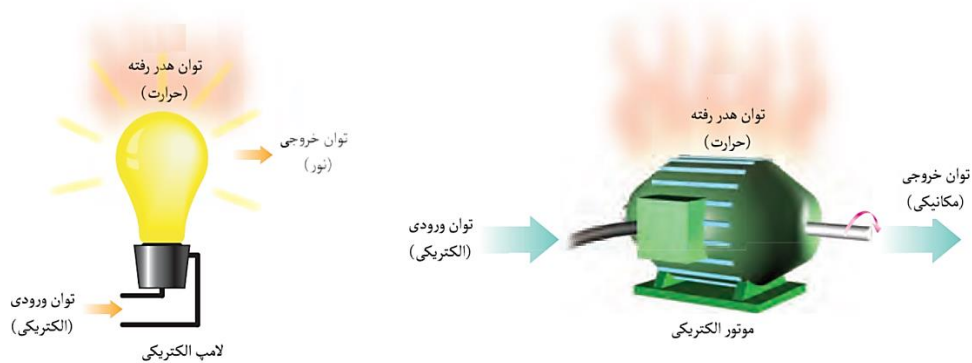
جدول ۳-۳: نرخ تبادل حرارت بدن با محیط خارج در فعالیت‌های مختلف [۵۷].

نرخ گرمادهی برحسب وات	نوع فعالیت
۷۵	در حالت خواب
۱۰۵	در حالت نشستن
۱۳۲	کار سبک
۳۵۲	کار سنگین

۳-۶-۱-۲- بار حرارتی لامپ، موتور و لوازم برقی

در رابطه با وسایل الکتریکی باید گفت که هیچ دستگاه الکتریکی راندمان کامل و ۱۰۰ درصد را ندارد بنابراین همواره بسته به راندمان دستگاه، توان خروجی از توان ورودی کمتر است. مقدار از توان ورودی

که به توان خروجی (کار) تبدیل نشده است همان اتلاف انرژی است که به صورت گرما از اجسام الکتریکی خارج می‌شود (شکل ۳-۳) [۶۳].



شکل ۳-۳: نحوه عملکرد وسایل الکتریکی

### ۳-۶-۲- بار حرارتی حاصل از حرکت دینامیکی قطار

این نوع بار حرارتی در اثر حرکات مربوط به قطار مخصوصاً ترمز گیری و شتاب گیری ایجاد می‌شود و رابطه مستقیمی با حرکت تند شونده و کند شونده قطار و سرعت معمولی آن دارد [۶۵].

حرکت قطارها از یک ایستگاه به ایستگاه بعد به این صورت است که ابتدا شتاب می‌گیرد تا به سرعت ثابت برسد و بعد از طی مسیری با سرعت ثابت و هنگام نزدیک شدن به ایستگاه حرکت کند شونده آن آغاز می‌شود و در نهایت در ایستگاه متوقف می‌شود. بیشترین سهم حرارت ایجاد شده مربوط به ترمز گیری و بعد شتاب گیری است که هر دو در مراحل در نزدیک ایستگاه اتفاق می‌افتد و باعث افزایش حرارت ایستگاه می‌شود [۶۶].

وقتی قطار دارای سرعت یکنواخت است توان مصرفی موتورهای برقی کم بوده و فقط برای از بین بردن اصطکاک بین ریل و قطار مصرف می‌شود؛ ولی وقتی قطار شتاب می‌گیرد موتورها در حداکثر قدرت خود شروع به کار می‌کنند و باعث افزایش مصرف برق و در نتیجه افزایش بار گرمایی می‌شود. سیستم ترمز گیری به این صورت است که مولدهای برق حرکت دینامیکی قطار را به برق تبدیل کرده و به عنوان مانعی در مقابل حرکت قطار عمل می‌کنند. برق تولید شده را می‌توان بازیابی کرد و دوباره به

شبکه برق فرستاد. چنانچه نتوان برق تولیدی را دوباره بازیابی کرد، برق ایجادشده در مقاومت‌های الکتریکی مخصوص که در زیر واگن‌ها نصب‌شده‌اند تبدیل به حرارت می‌شوند. حرارت ایجادشده باعث افزایش حرارت ایستگاه‌ها می‌شود [۶۵].

### ۳-۷- مراحل طراحی سیستم تهویه مطبوع

یک پروژه تهویه مطبوع شامل سه مرحله اساسی است [۵۷]:

- مطالعه و تعیین مشخصات اولیه
  - انتخاب نوع سیستم و محاسبه ظرفیت و اندازه‌های تجهیزات سیستم
  - مرحله اجرای پروژه (جایابی، نصب و آزمایش سیستم)
- ظرفیت تجهیزات مختلف یک سیستم تهویه مطبوع بر اساس مقدار بارهای حرارتی و یا برودتی ساختمان در روز طرح تعیین می‌شود. برای رسیدن به تهویه مطبوع باید اطلاعاتی را در مورد مکان موردنظر داشته باشیم این اطلاعات به‌صورت زیر است [۵۷].

- ظرفیت سیستم تهویه مطبوع
- بار حرارتی ساختمان
- روز طرح

### ۳-۷-۱- ظرفیت سیستم تهویه مطبوع

ظرفیت سیستم تهویه مطبوع مقدار حرارتی است که توسط تجهیزات مختلف سیستم به ساختمان داده و یا از آن گرفته می‌شود تا شرایط دلخواه از نظر دما، رطوبت، درجه تمیزی و غیره در هوای داخل ساختمان در هر زمان ایجاد گردد. ظرفیت بیشینه حرارتی و برودتی سیستم تهویه مطبوع حداقل باید به ترتیب برابر با بارهای حرارتی و برودتی ساختمان در روز طرح مربوطه باشد [۵۷].

### ۳-۷-۲- بار حرارتی ساختمان

این مورد در قسمت ۳-۶ به طور کامل بیان شده و باید در نظر داشت که برای طراحی سیستم تهویه محاسبه بار حرارتی یکی از مشکل ترین مراحل کار یک مهندس طراح است.

### ۳-۷-۳- روز طرح

در صنعت تهویه مطبوع برای جلوگیری از بالا رفتن هزینه‌ها، بجای اینکه ظرفیت سیستم را بر پایه روزهای با بار بیشینه در فصول زمستان و تابستان محاسبه کنند برای هر یک از دو فصل یک روز طرح تعیین و سپس محاسبات و انتخاب دستگاه‌ها برای روز طرح انجام می‌شود. روز طرح بر اساس شرایط آب و هوایی تعیین می‌شود که در طول چند سال به طور مداوم در منطقه موردنظر تکرار شده باشد. سیستم تهویه نباید بر پایه مقدار بیشینه یا کمینه شرایط آب و هوایی تعیین شود چراکه احتمال وقوع این روزها در سال یک یا چند بار است. در تعیین شرایط روز طرح برای هوای خارج باید مشخصات زیر مشخص شود [۵۷]:

- دمای خشک
- رطوبت نسبی یا دمای مرطوب هوا
- حدود تغییرات دما در روز طرح
- سرعت و جهت وزش باد

### ۳-۸- تهویه اضطراری

چنانچه یک سیستم تهویه صرفاً بر اساس رقیق کردن آلاینده‌ها طراحی شده باشد ممکن است برای آتش‌سوزی و دود مناسب نباشد. استانداردهای اجباری، تولیدکنندگان وسایل نقلیه را مجبور به بهبود تکنولوژی و کاهش میزان آلاینده‌ها می‌کند و هرروز این موضوع جدی تر می‌شود. پس حجم هوای تازه

موردنیاز برای تهویه تونل‌ها به مرور کاهش می‌یابد ولی کنترل دود ناشی از آتش‌سوزی ربطی به تکنولوژی وسایل نقلیه ندارد و مستقل از آن است [۵۷].

در مرحله طراحی بایستی به موضوع تهویه موردنیاز در زمان آتش‌سوزی توجه نمود و سپس شیوه‌های عملکرد تهویه در زمان آتش‌سوزی را مورد بررسی قرارداد. در حالت عادی ممکن است تهویه طبیعی یا تهویه ناشی از اثر پیستونی جوابگو باشد ولی در مواقع آتش‌سوزی نیاز به سیستم تهویه باشد که در این صورت سیستم تهویه تنها برای حالت اضطراری طراحی می‌شود [۶۸].

آتش‌سوزی در مترو به نحوی متفاوت از تونل‌های جاده‌ای است. در مترو از سیستم حمل‌ونقل ریلی که با برق کار می‌کند استفاده می‌شود و همچنین سعی می‌شود از تجهیزات نسوز استفاده شود؛ بنابراین در صورت آتش‌سوزی شعله آتش نسبت به دود آن مشکل کمتری را ایجاد می‌کند. هنگام آتش‌سوزی حجم زیادی از دود در محدوده مترو پخش می‌شود و باید هم‌زمان نسبت به کنترل دود و نجات مسافران اقدام کرد. یک سیستم تهویه خوب در شرایط اضطراری باید قادر باشد تا دود ناشی از آتش را به مسیری متفاوت از محل خروج مسافران هدایت کند. امروزه از تجهیزاتی در مترو استفاده می‌شود که احتمال آتش‌سوزی در آن را به حداقل برساند بنابراین اکثر آتش‌سوزی‌هایی که در سال‌های اخیر در مترو رخ داده است ناشی از ایجاد یک سانحه و یا آتش‌سوزی عامدانه بوده است. در تهویه اضطراری مترو باید به کنترل آتش و هدایت دود ناشی از آن برای ایجاد یک مسیر امن و خروج مسافران دقت شود [۳۲].

از دلایل متداول آتش‌سوزی در تونل‌های مترو می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۶۹]:

- بی‌دقتی مسافران در جابجایی و یا استفاده از مواد اشتعال‌زا
- از خط خارج شدن قطار و برخورد آن با سایر قطارها یا جداره تونل
- بروز نقص الکتریکی در سیستم‌های راهبری، نیروی محرکه و روشنایی و یا نقص در سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی داخل واگن‌ها
- بروز نقص مکانیکی در واگن‌ها نظیر سیستم ترمز

- بروز آتش‌سوزی عمدی

### ۳-۸-۱- اهداف تهویه اضطراری

از نقطه نظر ایمنی در زمان آتش‌سوزی موارد مختلفی باید در نظر گرفته شوند [۶۸].

۱. هدف از کنترل دود پخش‌شده در زمان آتش‌سوزی، ایجاد محیطی عاری از دود در فضای ترافیکی تونل است، این بدان معنی است که در زیر لایه دود جمع شده زیر سقف، فضای عاری از دود و مناسب تنفسی ایجاد نماییم و یا دود را به بیرون برانیم.
۲. در زمان آتش‌سوزی استفاده‌کنندگان از تونل باید بتوانند در زمان کوتاه و مناسب خود را به محیط امن برسانند و دود منتشر از آتش‌سوزی باید به نحوی کنترل شود تا فرصت فرار به افراد داده شود.
۳. مسیرهای فرار باید عاری از دود باشد و تهویه باید شرایط مناسب جهت خاموش کردن آتش را فراهم کند.

### ۳-۸-۲- قابلیت معکوس شدن سیستم تهویه

قابلیت معکوس شدن سیستم تهویه می‌تواند در زمان اضطراری بسیار مفید و کارآمد باشد این ویژگی مخصوصاً برای تونل‌هایی که راه‌های دسترسی متعددی دارند می‌تواند بسیار مفید باشد. زمانی که نیاز به معکوس کردن هوا داریم بایستی در نظر داشته باشیم که این تغییر حالت ممکن است ده دقیقه طول بکشد و بسته به سیستم تهویه، موقعیت جغرافیایی تونل، بادبزن‌های مورد استفاده و شرایط مرزی زمان آن کمتر و یا بیشتر از ده دقیقه شود. این نکته را نیز باید در نظر داشت که هنگامی که فن در شرایط معکوس کار می‌کند راندمان حالت قبل را ندارد مگر این‌که فن به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شده باشد که قابلیت معکوس‌پذیری آن ۱۰۰ درصد و دارای راندمانی مانند راندمان حالت کار عادی باشد. در سیستم مترو نیز برای مدیریت بحران در زمان آتش‌سوزی باید از فن‌هایی با قابلیت معکوس‌شوندگی استفاده

شود. کنترل حالت فن در زمان آتش‌سوزی به صورت دستی بوده و توسط شخص کنترل می‌شود و معمولاً باید این تغییرات در سیستم تهویه با واحد آتش‌نشان هماهنگ باشد [۶۸].

### ۳-۹- جمع‌بندی

برای داشتن یک تهویه مطبوع و مناسب باید ابتدا اهداف و وظایف سیستم موردنظر ارزیابی شود و در راستای رسیدن به این اهداف به طراحی سیستم تهویه پردازیم. در حالت عادی سیستم تهویه باید شرایط محیطی مناسب جهت آسایش حرارتی مسافران و در حالت اضطراری یک مسیر امن برای خروج مسافران را فراهم کند. بار حرارتی تولیدشده در مترو از مهم‌ترین مواردی است که باید در زمان طراحی سیستم به آن توجه شود و محاسبات مربوط به بار حرارتی باید با دقت انجام شود.

طراحی و استفاده از فن‌های سیستم تهویه باید به گونه‌ای باشد که قابلیت معکوس شدن داشته باشند علاوه بر این تا جایی که امکان دارد باید در زمان احداث ساختمان مترو به راه‌های فرار و معابر مربوط به مسافران توجه شود.





## فصل چهارم

دینامیک سیالات محاسباتی و کاربرد آن در تهویه

همه انواع سیستم‌های تهویه کم‌وییش با جریان یا توزیع سیال ارتباط دارند. در سیستم تهویه نیز با هوا که مجموعه‌ای از گازهای جو و بخار آب است سروکار داریم که می‌توان از قوانین حاکم بر سیالات در حل و بررسی مسائل مربوط به تهویه بهره برد [۶۴].

مکانیک واقعی جریان سیالات بسیار پیچیده است. اما از برخی از فرض‌های ساده کننده، مانند فرض گاز ایده آل یا گاز کامل می‌توان استفاده کرد، به طوری که نتایج حاصل برای کارهای مهندسی بازم به اندازه کافی صحیح و دقیق باشند. سیال ایده آل سیالی است که در آن اثرهای ویسکوزیته و تراکم‌پذیری را بتوان ندید گرفت. سیال ایده آل هرگز یافت نمی‌شود ولی بیشتر سیالات مربوط به تهویه مطبوع را در گستره دماها و فشارهای عادی مورد عمل می‌توان سیال ایده آل فرض کرد، بدون آنکه با این فرض هیچ‌گونه اشتباه جدی روی دهد [۶۴].

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی شده است که از توانایی‌های کامپیوتر برای طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع و مطالعه پدیده‌های حاکم بر آن استفاده شود؛ این تلاش‌ها امروزه منجر به استفاده از نرم‌افزارهایی شده است که بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استوارند و برای محاسبه و بررسی فرایندهای تهویه مطبوع بکار برده می‌شوند. اکثریت این نرم‌افزارها بر پایه حل معادلات ناویر-استوکس، معادله انرژی، معادله بقاء جرم و غلظت‌ها و همچنین حل معادلات دیفرانسیل برای مدل‌سازی پدیده‌هایی مانند اغتشاش و تابش عمل می‌کنند. با استفاده از این نرم‌افزارها امکان مطالعه دقیق جریان‌های طبیعی و اجباری هوا در داخل فضاهای ساختمان و در داخل کانال‌ها و دستگاه‌های مختلف تهویه مطبوع، جریان سیال در داخل مجراهای مختلف، حرکت دود و گازهای احتراقی، چگونگی گسترش آتش در ساختمان و ... فراهم شده است [۵۷].

در این فصل به بررسی معادلات حاکم بر دینامیک سیالات محاسباتی و کاربرد آن در طراحی سیستم تهویه پرداخته شد.

## ۴-۲- مدل های جریان

برای به دست آوردن معادلات اساسی حرکت سیال روش زیر همیشه بکار می رود [۱۸]:

۱. اصول اساسی فیزیک از قوانین فیزیکی گرفته می شود این اصول شامل بقای جرم، قانون دوم نیوتون ( $F=ma$ ) و بقای انرژی است.

۲. این اصول فیزیکی در مورد مدل مناسبی از جریان بکار برده می شود.

۳. معادلات ریاضی که چنین اصول فیزیکی را در بردارند استخراج می شود.

یک جسم جامد به راحتی دیده و تعریف می شود از سوی دیگر سیال یک جسم نرم است که نمی شود آن را به دست گرفت. اگر یک جسم جامد در حرکت باشد سرعت تمام قسمت های آن یکسان است ولی برای یک جسم سیال این شرط برقرار نیست بلکه سرعت در نقاط مختلف سیال ممکن است متفاوت باشد. برای این که بتوانیم اصول اساسی فیزیک را در یک سیال متحرک اعمال کنیم باید یکی از مدل های حجم محدود<sup>۱</sup>، المان محدود<sup>۲</sup> و تئوری سینتیک<sup>۳</sup> را در نظر بگیریم [۱۸].

حل گره های ANSYS Fluent مبتنی بر روش حجم محدود است. در این پایان نامه نیز از حل گر ANSYS Fluent استفاده شده است به همین دلیل تنها روش حجم محدود توضیح داده شده است و برای مطالعه بیشتر لازم است به منابع ۱۸ و ۷۰ رجوع شود.

برای بررسی روش حجم محدود یک میدان جریان در حالت کلی در نظر می گیریم که مانند شکل ۴-۱ به وسیله خطوط جریان مشخص شده باشد. فرض می کنیم یک حجم بسته به داخل جریان کشیده می شود این حجم را با  $V$  نمایش می دهیم. سطح بسته ای که این حجم را محدود می کند سطح کنترل نامیده می شود و با  $S$  مشخص می کنیم. حجم کنترل ممکن است که با سیال حرکت کند به گونه ای که

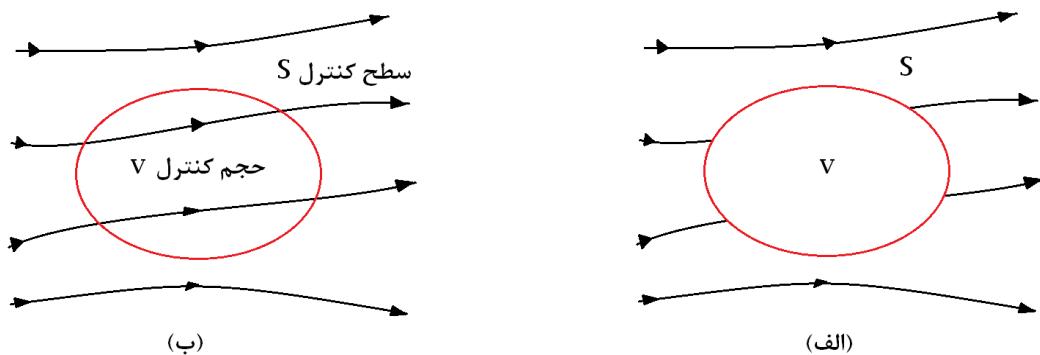
---

۱- Finite Volume

۲- Finite Element

3- Kinetic theory

ذرات سیال در داخل آن همواره یکسان باشد (شکل ۴-۱-الف) و یا ممکن است در فضا ثابت شده باشد و سیال از آن عبور کند (شکل ۴-۱-ب)، در هر حال حجم کنترل یک ناحیه نسبتاً بزرگ و محدود از جریان سیال است. اصول اساسی فیزیک بر روی سیال داخل حجم کنترل اعمال می‌شود و اگر حجم کنترل در فضا ثابت باشد این اصول بر روی سیال در حال عبور از سطح کنترل اعمال می‌شود. با این روش بجای این که تمام میدان جریان را تحت مطالعه قرار دهیم با مدل حجم کنترل توجه ما فقط به قسمتی از سیال در ناحیه محدودی از میدان جریان محدود می‌شود. معادلات جریان سیال که مستقیماً از اعمال اصول اساسی فیزیک بر روی حجم کنترل محدود به دست می‌آید به فرم انتگرالی هستند. این معادلات مشخصه انتگرالی را می‌توان به‌طور غیرمستقیم به معادلات دیفرانسیل جزئی تبدیل کرد [۱۸].



شکل ۴-۱: مدل حجم محدود (الف) حجم کنترل محدود متحرک، (ب) حجم کنترل محدود ثابت شده [۱۸].

در روش حجم محدود، معادلات در شکل انتگرالی استفاده می‌شود. محدوده حل به تعداد معینی حجم کنترل مجاور هم تقسیم شده و معادلات در آن محدوده حل می‌گردد. کمیت‌ها در مرکز گره‌ها محاسبه شده و جهت به دست آوردن مقادیر روی سطوح باید درون‌یابی انجام گیرد. روش حجم محدود برای تمام هندسه‌ها از جمله هندسه‌های پیچیده کاربرد دارد [۷۰].

## ۴-۳- معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت

معادلات حاکم بر جریان سیال بیانگر قوانین فیزیکی بقاء به صورت عبارات ریاضی می‌باشند که برخی از این قوانین عبارت‌اند از [۱۶]:

- جرم سیال همواره ثابت می‌ماند.
- نرخ تغییر اندازه حرکت با برآیند نیروهای وارد روی ذره سیال برابر است (قانون دوم نیوتون)
- نرخ تغییر انرژی با مجموع نرخ افزایش حرارت سیستم و نرخ کار انجام شده روی ذره سیال برابر است (قانون اول ترمودینامیک)

سیال باید به صورت پیوسته در نظر گرفته شود. در این بررسی ساختار مولکولی مواد و حرکت مولکولی که در مقیاس میکروسکوپی رخ می‌دهد را نادیده می‌گیریم و به بررسی رفتار سیال در قالب ماکروسکوپی مانند سرعت، فشار، چگالی و درجه حرارت و مشتقات زمانی و مکانی آن‌ها می‌پردازیم [۱۶].

در حالت کلی حرکت سه‌بعدی، میدان جریان با بردار سرعت مشخص می‌شود:

$$\vec{q} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (\text{معادله ۴-۱})$$

در این رابطه  $u$ ،  $v$  و  $w$  سه مؤلفه متعامد سرعت می‌باشند. فشار ( $P$ )، چگالی ( $\rho$ ) و دما ( $T$ ) به صورت توابعی از مختصات زمان ( $t$ ) و مکان بیان می‌شوند. برای تعیین این کمیت‌ها معادلاتی وجود دارد که عبارت‌اند از: معادله پیوستگی (بقای جرم)، معادلات حرکت (بقای اندازه حرکت)، معادله انرژی (بقای انرژی) و معادله ترمودینامیک حالت (معادله حالت) [۷۱].

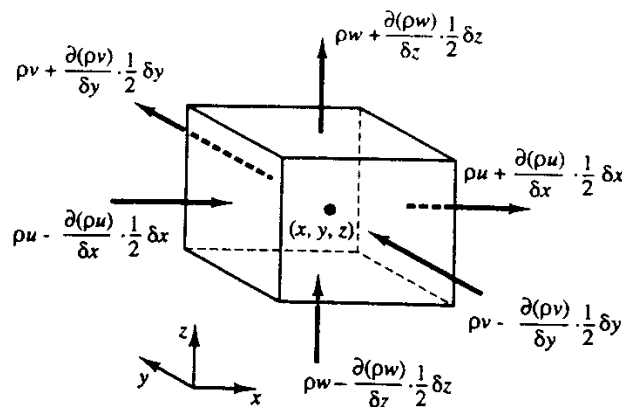
### ۴-۳-۱- معادله بقای جرم

گام نخست برای به دست آوردن معادله بقاء جرم، نوشتن تعادل جرم برای المان سیال است. این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۶].

نرخ افزایش جرم در المان سیال = نرخ خالص جریان جرم ورودی به المان سیال

برای به دست آوردن معادله بقای جرم ابتدا یک المان سیال را که جریان‌های جرمی ورودی و خروجی را نشان می‌دهد در نظر می‌گیریم (شکل ۲-۴) نرخ افزایش جرم در المان سیال عبارت است از [۱۶]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho dx dy dz) = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (\text{معادله ۲-۴})$$



شکل ۲-۴: جریان‌های جرمی ورودی و خروجی از المان سیال [۱۶].

برای محاسبه نرخ جریان سیال عبوری از وجوه المان که بر اساس مقدار چگالی داده شده است، به سطح و مؤلفه عمود بر سطح نیاز داریم. در شکل ۲-۴ نرخ خالص جریان‌های ورودی به المان و خروجی از المان در مرزهای آن مشخص شده است. جریان‌های ورودی به المان که باعث تولید و افزایش جرم در المان می‌شوند را با علامت مثبت و جریان‌هایی که از المان خارج می‌شوند را با علامت منفی مشخص می‌شوند [۱۶].

چنانچه معادله مربوط به تعادل جرم را در المان بنویسیم و تمام جملات هم علامت حاصل از تعادل جرم را مرتب کنیم و بر حجم المان ( $dx dy dz$ ) تقسیم کنیم معادله ۳-۴ به دست می‌آید. اگر  $\bar{u}$ ،  $\bar{v}$  و  $\bar{w}$  سه مؤلفه لحظه‌ای<sup>۱</sup> سرعت به ترتیب در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  باشند و  $\rho$  چگالی جرم سیال و  $t$  زمان باشد، در این صورت نرخ افزایش چگالی جرم  $\rho$  در داخل حجم کنترل  $dx dy dz$  برابر شار ورودی خالص به حجم کنترل می‌شود. یعنی داریم [۱۶ و ۵۷]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (\text{معادله ۳-۴})$$

چنانچه معادله فوق در حالت برداری بیان شود داریم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \bar{\mathbf{V}} \cdot \bar{\mathbf{q}} = 0 \quad (\text{معادله ۴-۴})$$

معادله ۴-۴ رابطه ناپایدار بقاء جرم در حالت سه‌بعدی یا معادله پیوستگی در یک نقطه از یک سیال قابل تراکم است. جمله اول در سمت چپ، نرخ تغییرات چگالی در واحد زمان (جرم واحد حجم) است. جمله دوم بیانگر جریان خالص خروجی از مرزهای المان به بیرون است، که عبارت جابجایی نامیده می‌شود. در صورتی که سیال غیرقابل تراکم باشد چگالی  $\rho$  ثابت بوده و معادله (۴-۴) به صورت زیر درمی‌آید [۱۶].

$$\bar{\mathbf{V}} \cdot \bar{\mathbf{q}} = 0 \quad (\text{معادله ۵-۴})$$

یا به صورت بازتر می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{معادله ۶-۴})$$

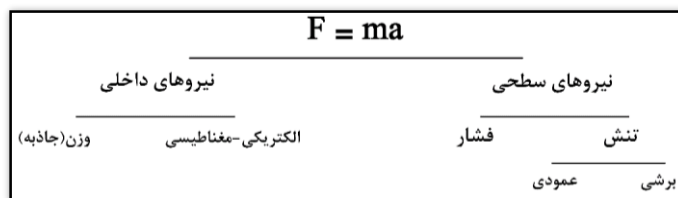
---

۱- Instantaneous



#### ۴-۳-۲- معادلات حرکت

معادلات حرکت از قانون دوم نیوتون درباره حرکت مشتق می‌شوند؛ قانون دوم نیوتون بیان می‌کند که نرخ تغییر اندازه حرکت یک ذره سیال برابر است با برآیند نیروهای وارد شده بر ذره. علاوه بر این در حرکت سیال لازم است دو نوع از نیروها را به صورت مجزا در نظر گرفت: (الف) نیروهای وارد بر کل جسم یا نیروهای داخلی که نیروهای حجمی نامیده می‌شوند و (ب) نیروهای وارد بر مرز که نیروهای سطحی نامیده می‌شوند. قانون دوم نیوتن را برای درک بهتر می‌توان به شکل دیاگرام زیر نمایش داد [۱۸ و ۷۱].



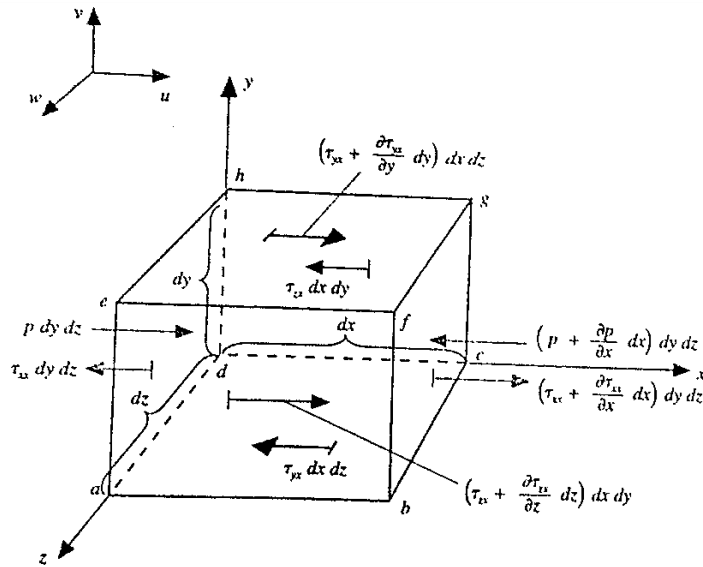
شکل ۴-۳: دیاگرام قانون دوم نیوتون دینامیک سیالات [۱۸].

قانون دوم نیوتون در مورد المان متحرک سیال می‌گوید که نیروی خالص وارد بر المان سیال برابر است با جرم المان سیال ضرب در شتاب آن. این یک معادله برداری است و می‌توان آن را به صورت سه معادله اسکالر در جهت محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  نوشت. در حالت کلی سه مؤلفه تنش عمودی (فشار،  $p$ ) در جهت‌های مثبت و منفی هر محور، و شش مؤلفه تنش لزوج (تنش برشی،  $\tau$ ) نیز در دو جهت هر محور به المان وارد می‌شود. برای رسیدن به معادلات حرکت با استفاده از شکل ۴-۴ تنها به بررسی مؤلفه  $x$  معادله مومنوم می‌پردازیم و بعد از آن مؤلفه  $y$  و  $z$  مربوط به آن را به دست می‌آوریم [۱۶ و ۱۸].

مؤلفه  $x$  قانون دوم نیوتن به صورت زیر است:

$$F_x = ma_x \quad (\text{معادله ۴-۷})$$

که در آن  $F_x$  و  $a_x$  به ترتیب مؤلفه‌های اسکالر بردار نیرو و شتاب در امتداد محور  $x$  می‌باشند.



شکل ۴-۴: المان مربوط به سیال که تنها مؤلفه‌های تنش در جهت x آن مشخص شده است [۱۸].

در رابطه با سمت چپ معادله ۷-۴ قبلاً بحث شد و بیان شد که نیروهای وارد بر المان چگونه و از چه نوع می‌باشند و در شکل ۳-۴ دیاگرام آن رسم شد. نیروهای جسمی وارد بر حجم المان سیال را  $f$  و مؤلفه x آن را  $f_x$  می‌نامیم. حجم المان سیال برابر با  $dx dy dz$  است و در نتیجه [۱۸]:

$$\text{نیروی جسمی وارد بر المان سیال در جهت } x = \rho f_x (dx dy dz) \quad (\text{معادله ۴-۸})$$

برای به دست آوردن نیروی سطحی خالص در جهت x با توجه به شکل ۴-۴ باید برآیند تمام نیروهای سطحی را در همان جهت به دست آورد. بنابراین اگر نیروی سطحی خالص در جهت x را  $N$  بنامیم داریم:

$$N = \left[ p - \left( p \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dy dz + \left[ \left( + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dy dz + \dots \quad (\text{معادله ۴-۹})$$

برآیند نیروها در جهت x از حاصل جمع معادله ۴-۸ و ۴-۹ به دست می‌آید. پس از جمع کردن و ساده کردن معادله ۴-۱۰ به دست می‌آید این معادله برای تمام سیالات همگن نیوتونی برقرار است؛ کلیه گازها و اکثر مایعات متداول به‌ویژه آب به این دسته از سیالات تعلق دارند [۱۸ و ۷۱].

$$F_x = \left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho f_x dx dy dz \quad (\text{معادله ۴-۱۰})$$

معادله ۴-۱۰ در واقع سمت چپ معادله ۴-۷ است؛ این قسمت از معادله را در نظر می‌گیریم،

می‌دانیم که جرم المان سیال ثابت و برابر است با:

$$m = \rho dx dy dz \quad (\text{معادله ۴-۱۱})$$

همچنین می‌دانیم که شتاب المان سیال عبارت است از شدت زمانی تغییر سرعت. در نتیجه مؤلفه

شتاب در جهت  $x$  ( $a_x$ ) عبارت است از شدت تغییر زمانی  $u$ . از آنجاکه المان متحرک سیال مورد نظر

است این تغییر شدت زمانی به صورت مشتق مادی بیان می‌شود [۱۸]:

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (\text{معادله ۴-۱۲})$$

از تلفیق معادلات ۴-۷، ۴-۱۰، ۴-۱۱ و ۴-۱۲ داریم:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (\text{معادله ۴-۱۳ الف})$$

معادله فوق مؤلفه  $x$  معادله حرکت برای المان سیال است و به همین ترتیب مؤلفه‌های  $y$  و  $z$  معادله

حرکت به صورت زیر است [۱۸]:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (\text{معادله ۴-۱۳ ب})$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (\text{معادله ۴-۱۳ ج})$$

معادلات ۴-۱۳ الف، ب و ج اساس کل دانش مکانیک سیالات را تشکیل می‌دهند و به نام معادلات

ناویر-استوکس<sup>۱</sup> معروف می‌باشند. معادلات فوق معادلات دیفرانسیل جزئی هستند که مستقیماً از کاربرد

اصل بنیادی فیزیک در مورد یک المان بی‌نهایت کوچک سیال به دست آمده‌اند.

---

۱- Navier-Stokes

### ۴-۳-۳- معادله انرژی

در این قسمت سومین اصل فیزیک یعنی اصل بقای انرژی را مورد بحث قرار می‌دهیم. اصل بقای انرژی چیزی به جز قانون اول ترمودینامیک نیست. معادله انرژی از قانون اول ترمودینامیک به دست می‌آید که بیان می‌کند نرخ تغییر انرژی ذره سیال برابر است با نرخ حرارت اضافه‌شده به ذره سیال به‌علاوه نرخ کار انجام‌شده بر روی ذره [۱۶ و ۱۸].

$$\begin{array}{l} \text{نرخ خالص کار انجام‌شده روی} \\ \text{ذره سیال} \end{array} + \begin{array}{l} \text{نرخ خالص حرارت} \\ \text{اضافه‌شده به ذره سیال} \end{array} = \begin{array}{l} \text{نرخ افزایش انرژی ذره} \\ \text{سیال} \end{array}$$

یا داریم:

$$A = B + C \quad (\text{معادله ۴-۱۴})$$

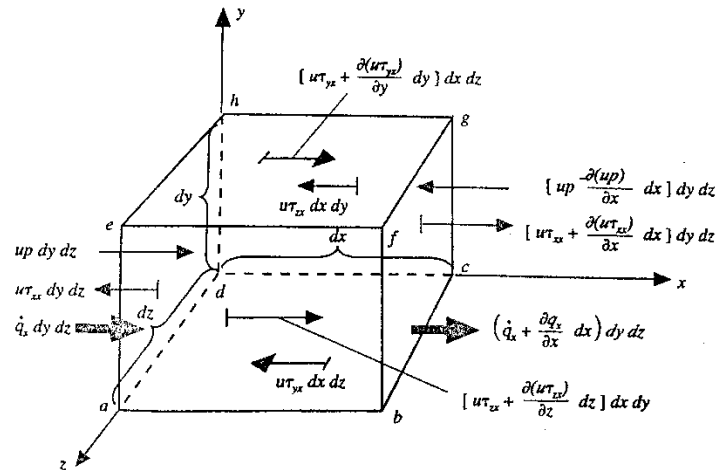
که در این معادله مفهوم فیزیکی  $A$ ،  $B$  و  $C$  در قالب عبارات فوق بیان شده است.

برای این قسمت المان بکار رفته در شکل ۴-۴ در نظر گرفته شد. ابتدا مقدار  $C$  یعنی شدت کار انجام‌شده بر روی المان سیال ناشی از نیروهای داخلی و سطحی به دست آورده شد. شدت انجام کار توسط نیروی وارد بر یک جسم متحرک برابر است با حاصل ضرب نیرو در مؤلفه سرعت در جهت نیرو. بنابراین شدت کار انجام‌شده توسط نیروی داخلی وارد بر المان متحرک سیال با سرعت  $V$  برابر است با [۱۸]:

$$\text{شدت کار انجام‌شده توسط نیروی داخلی} = pf \cdot V(dx dy dz) \quad (\text{معادله ۴-۱۵})$$

برای مطالعه نیروهای سطحی (فشار، تنش برشی و تنش عمودی) همانند مرحله قبل نیروهای وارد در جهت  $x$  را در نظر گرفته شد. شدت کار انجام‌شده بر روی المان متحرک سیال توسط نیروهای فشاری و برشی در جهت  $x$  برابر است با مؤلفه  $x$  سرعت ضربدر نیروهای مربوطه. در شکل ۴-۵ شدت کار انجام‌شده بر روی هر وجه توسط نیروهای سطحی در جهت  $x$  به‌طور واضح نشان داده شده است.

باید توجه داشت که نیروهای عامل در جهت مثبت X کار مثبت و نیروهای عامل در جهت منفی X کار منفی انجام می‌دهند [۱۸].



شکل ۴-۵: جریان‌های انرژی مربوط به المان سیال، تنها جریان‌های مربوط به جهت X نشان داده شده است [۱۸].

اگر تمام نیروهای سطحی وارده در جهت X را باهم جمع کنیم بعد از ساده کردن معادله زیر به دست می‌آید.

$$\text{معادله ۴-۱۶)} \quad C = \left[ -\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] dx dy dz \quad \text{نیروهای سطحی (X)}$$

معادله ۴-۱۶ تنها نیروهای سطحی در جهت X را نشان می‌دهد. اگر جهات Y و Z را نیز بررسی کنیم معادلات مشابهی به دست می‌آیند. حال با توجه به معادله ۴-۱۴ می‌توانیم نرخ خالص کار انجام شده روی ذره سیال را به دست بیاوریم که با علامت C نشان داده می‌شود.

$$C = - \left[ \begin{aligned} & \frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} \\ & + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} \\ & + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \right] dx dy dz + \rho f \cdot V dx dy dz$$

(معادله ۴-۱۷)

مقدار C در معادله ۴-۱۴ را به دست آورده‌یم حال به بررسی مقدار B می‌پردازیم. نرخ خالص حرارت اضافه‌شده به ذره سیال ممکن است ناشی از عوامل زیر باشد:

(۱) حرارت حجمی از قبیل گرم شدن و سرد شدن بر اثر تابش.

(۲) انتقال حرارت از یک‌طرف سطح به طرف دیگر آن بر اثر هدایت حجمی به ازای واحد جرم که این مقدار را با  $\dot{q}$  نشان می‌دهیم.

با توجه به جرم المان سیال در شکل ۴-۵ مقدار گرمای حجمی المان برابر است با:

$$\text{مقدار گرمای المان} = \rho \dot{q} dx dy dz \quad (\text{معادله ۴-۱۸})$$

اگر وجه adhe در شکل ۴-۵ را در نظر بگیریم شار حرارتی منتقل‌شده به داخل سیال برابر است با  $\dot{q}_x dy dz$  که در آن  $\dot{q}_x$  حرارت منتقل‌شده در جهت x در واحد زمان از واحد سطح از راه هدایت حرارتی است. حرارت منتقل‌شده در یک‌جهت معلوم وقتی که بر حسب انرژی در واحد زمان از واحد سطح بیان شود اصطلاحاً شار حرارتی در آن جهت نامیده می‌شود. حرارت منتقل‌شده به خارج المان از طریق وجه bcgf برابر است با  $[\dot{q}_x + (\partial \dot{q}_x / \partial x) dx] dy dz$ ، بنابراین مقدار خالص حرارت منتقل‌شده در جهت x به داخل المان سیال از طریق هدایت حرارتی برابر است با [۱۸]:

$$[\dot{q}_x - (\dot{q}_x + \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} dx)] dy dz = -\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} dx dy dz \quad (\text{معادله ۴-۱۹})$$

با در نظر گرفتن انتقال حرارت در جهات y و z از وجوه دیگر شکل ۴-۵ داریم:

$$\text{مقدار گرمای المان سیال بر اثر شار حرارتی} = -\left(\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z}\right) dx dy dz \quad (\text{معادله ۴-۲۰})$$

حال می‌توانیم مقدار B را در معادله ۴-۱۵ را از مجموع معادلات ۴-۱۹ و ۴-۲۰ به دست بیاوریم:

$$B = [\rho \dot{q} - \left(\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z}\right)] dx dy dz \quad (\text{معادله ۴-۲۱})$$

شار حرارت بر اثر هدایت حرارتی طبق قانون هدایت فوریه متناسب است با گرادیان درجه حرارت

در جهت موردنظر:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (\text{معادله ۴-۲۲})$$

در رابطه فوق  $k$  ضریب هدایت حرارتی است بنابراین معادله ۴-۲۱ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$B = [\rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z})] dx dy dz \quad (\text{معادله ۴-۲۳})$$

مقدار  $B$  و  $C$  در معادله ۴-۱۴ را تا این مرحله به دست آوردیم حال به بررسی مقدار  $A$  که شدت زمانی تغییر انرژی المان سیال است می‌پردازیم. در اینجا منظور از انرژی داخلی مجموع انرژی تمام مولکول‌ها و اتم‌های سیستم است. حال می‌توانیم بگوییم که جمله  $A$  در معادله ۴-۱۴ انرژی یک المان سیال متحرک را بیان می‌کند و چنین المانی می‌تواند دو نوع انرژی داشته باشد.

(۱) انرژی داخل ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها که مقدار آن را در واحد جرم  $e$  می‌نامیم.

(۲) انرژی جنبشی مربوط به حرکت انتقالی المان سیال. مقدار این انرژی در واحد جرم برابر با  $V^2/2$  است.

حال می‌توانیم مقدار  $A$  را که در واحد جرم توسط مشتق مادی بیان می‌شود و با توجه به این که جرم المان سیال  $\rho dx dy dz$  است به دست آوریم.

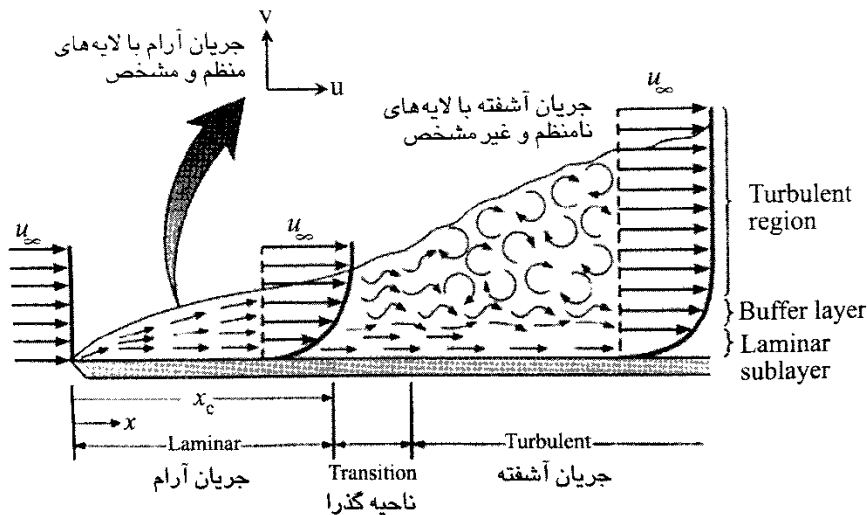
$$A = \rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{V^2}{2} \right) dx dy dz \quad (\text{معادله ۴-۲۴})$$

شکل نهایی معادله انرژی از جای گذاری معادلات ۴-۱۷، ۴-۱۳ و ۴-۲۴ در معادله ۴-۱۴ به دست می‌آید [۱۸]:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V \quad (\text{معادله ۴-۲۵})$$

## ۴-۴- جریان سیال و آشفتگی

جریان آرام جریانی است که در آن سیال به صورت منظم و تحت لایه‌ها و مسیرهای مشخص و منظم حرکت می‌کند. اما معمولاً در اکثر جریان‌های مهندسی، وضع به همین منوال باقی نمی‌ماند و با حرکت به سمت پایین دست جریان و هم‌زمان با بلوغ جریان و انباشته شدن اغتشاشات جریانی روی یکدیگر و پس از طی شدن مرحله میانی که اصطلاحاً مرحله گذار نامیده می‌شود به یک جریان آشفته<sup>۱</sup> خواهیم رسید. حالت تغییر جریان آرام به جریان آشفته در شکل ۴-۶ نشان داده شده است [۷۰].



شکل ۴-۶: لایه مرزی تشکیل شده جریان روی یک صفحه تخت [۷۰].

تمام جریان‌هایی که در مهندسی عملی به حساب می‌آیند، اعم از مواد ساده نظیر فواره‌های دوبعدی، دنباله‌ها، جریان‌های لایه مرزی لوله و صفحه تخت و یا موارد خیلی پیچیده سه‌بعدی از یک عدد رینولدز<sup>۲</sup> معین  $(v l / \nu)$  که  $v$  و  $l$  به ترتیب مشخصه‌های سرعت و مقیاس طول جریان متوسط و  $\nu$  لزجیت سینماتیکی است) بالاتر ناپایدار است. در اعداد رینولدز پایین جریان آرام است. در اعداد رینولدز بالا مشاهده می‌شود که جریان آشفته می‌شود [۱۶].

۱- Turbulence

۲- Reynolds number



در موارد ساده معادلات پیوستگی و ناویر-استوگس را می‌توان به صورت تحلیلی حل کرد. جریان‌های پیچیده‌تر را می‌توان از طریق عددی با روش‌های CFD نظیر روش حجم محدود و بدون استفاده از تقریب‌های اضافی حل کرد. غالب جریان‌های بااهمیت در مهندسی جریان آشفته هستند، لذا منطقه جریان آشفته تنها از نظر تئوری مهم نیست. مهندس سیالات نیاز به ابزار قابلی دارد که بیانگر اثرات آشفته‌گی باشد [۱۶].

مدل‌سازی جریان آشفته یکی از سه عنصر کلیدی در دینامیک سیالات محاسباتی است. تئوری‌های بسیار دقیق ریاضی برای تکامل دو عنصر کلیدی دیگر یعنی شبکه‌سازی و توسعه الگوریتم ایجادشده است. حال باید بدانیم که مدل ایده آل جریان آشفته چیست و تا چه حد باید پیچیده باشد [۷۲].

مدل ایده آل باید با کمترین میزان پیچیدگی درعین حال اساس فیزیکی ذریبط را در برگیرد. این توصیفی از مدل ایده آل است. برای پی‌بردن به مقدار پیچیدگی یک مدل باید ابتدا به بررسی و شناخت میزان جزئیات موردنیاز در مدل دینامیک سیالات محاسباتی بپردازیم. خاصیت‌های مناسب هر جریان معینی معمولاً توسط کاربرد آن جریان مشخص می‌شود. برای ساده‌ترین کاربردها ممکن است فقط انتقال پوستی و ضریب‌های انتقال حرارت موردنیاز باشند. در کاربردهای پیچیده‌تر ممکن است اطلاعات کاملی از طیف انرژی، مقادیر نوسانی جریان آشفته و مقیاس‌های آن مطلوب باشند. بنابراین به بیان کیفی، زمانی که به پرسش در مورد چگونگی میزان جزئیات موردنیاز پاسخ داده شود، به دنبال آن پیچیدگی مدل ظاهر می‌شود [۷۲].

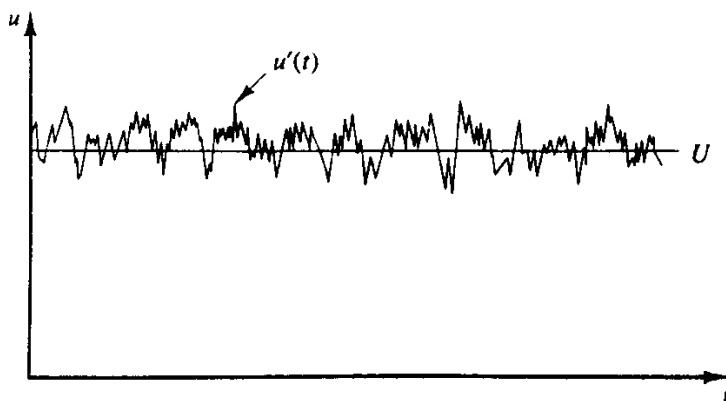
#### ۴-۵- آشفته‌گی چیست؟

عدد رینولدز ( $Re$ ) یک جریان، نسبت اندازه نیروی اینرسی به نیروی لزجت را می‌دهد. در آزمایش‌های روی سیستم سیال مشاهده شده است که در عدد رینولدز پایین‌تر از به اصطلاح بحرانی جریان صاف و

لایه‌ها روی هم می‌لغزند، اگر شرایط مرزی با زمان تغییر نکند جریان دائمی است این منطقه جریان آرام نامیده می‌شود.

$$Re = \rho \frac{vl}{\mu} \quad (\text{معادله ۴-۲۶})$$

در مقادیر عدد رینولدز بالاتر از بحرانی یکسری حوادث اتفاق می‌افتد که نهایتاً سبب تغییرات جدی در رفتار جریان می‌شود. در نهایت رفتار جریان تصادفی و نامنظم شده و حتی با شرایط مرزی ثابت حرکت کاملاً غیردائمی می‌شود. سرعت و سایر خواص جریان به صورت تصادفی تغییر می‌کند. این منطقه ناحیه جریان آشفته نامیده می‌شود. نمونه‌ای از اندازه‌گیری سرعت را در جریان آشفته می‌توان در شکل ۴-۷ مشاهده کرد [۱۶].



شکل ۴-۷: اندازه‌گیری سرعت در یک نقطه در جریان آشفته [۱۶].

طبیعت تصادفی جریان آشفته مانع از محاسبات و بررسی کامل حرکت همه ذرات سیال می‌شود. در عوض می‌توان سرعت را به دو بخش مقدار متوسط دائمی (U) و مؤلفه نوسانی ( $u'(t)$ ) که با آن جمع می‌شود تقسیم کرد [۱۶].

$$u(t) = U + u'(t) \quad (\text{معادله ۴-۲۷})$$

## ۴-۶- مدل سازی جریان های آشفته

اگر از دیدگاه امروزی به مسئله آشفتگی پردازیم، شاید بیشترین پیشرفت نسبت به دهه های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ میلادی، پیشرفت در روش های محاسباتی باشد (و سخت افزار لازم برای اجرای آنها). اولین آنها شبیه سازی گردابه های بزرگ یا <sup>۱</sup>LES بود که به وسیله دردورف<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۰ ارائه شد. به دنبال آن به سرعت روش شبیه سازی عددی مستقیم یا <sup>۳</sup>DNS به وسیله اورساگ<sup>۴</sup> و پترسون<sup>۵</sup> در سال ۱۹۷۲ ارائه شد. همچنین گستره ی وسیعی از روش ناویر-استوکس میانگین گیری شده رینولدز یا <sup>۶</sup>RANS در آن سال مورد بررسی قرار گرفت. از آن زمان تا دهه ۱۹۹۰ به دلیل کمبود امکانات محاسباتی برای روش های LES و DNS، روش RANS به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفت [۷۰].

از نظر ماهیت محاسبات، روش LES بین روش RANS و DNS محسوب می شود. در روش RANS با متوسط گیری زمانی، مقادیر متوسط متغیرها محاسبه می شود. اما روش DNS بدون هیچ گونه مدل سازی و با اعمال شبکه بندی در حد کوچک ترین مقیاس ها به حل جریان می پردازد. در روش RANS، پارامترها به دو جمله نوسانی و متوسط که شامل تمامی مقادیر نوسان است مدل سازی می شوند. مزیت LES نسبت به RANS در آن است که ابتدا مقیاس های بزرگ از مقیاس های کوچک جدا شده و سپس نوسان موجود در مقیاس های کوچک مدل سازی می شود [۷۰].

در LES می توان مطمئن بود که هرگونه حرکتی در مقیاس های شامل انرژی های بزرگ، به صورت مستقیم، مانند روش DNS محاسبه می شود. در این روش طیف گردابه های متلاطم در معادلات ناویر-

---

۱- LES: Large Eddy Simulation

۲- Deardorff

۳- DNS: Direct Numerical Simulation

۴- Orszag

۵- Peterson

۶- RANS: Reynoldz -averaged Navier -Stokes

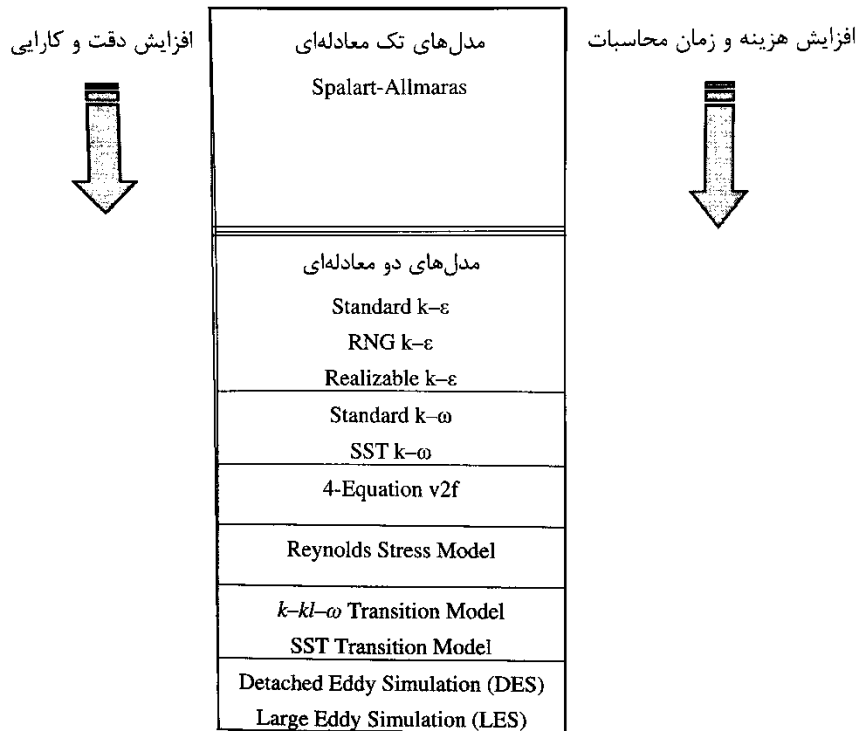
استوکس فیلتر شده است. فیلتر تابعی از اندازه شبکه است. گردابه‌های کوچک‌تر از اندازه شبکه حذف شده و با یک مدل برای مقیاس زیر شبکه مدل‌سازی می‌شوند. درجایی که مدل‌های RANS نیازهای مسئله را برآورده نمی‌کند، LES موفق‌ترین مدل برای شبیه‌سازی جریان آشفته است. برای مثال می‌توان احتراق، اختلاط و ایرودینامیک خارجی (جریان حول اجسام گرد) را نام برد [۷۰].

دروش DNS تمامی کمیت‌های نوسانی جریان حل می‌شود. برای این امر باید هم‌مش بسیار ریز بوده و هم‌گام زمانی بسیار کوچک باشد. درواقع این نوع شبیه‌سازی تنها یک ابزار تحقیقاتی برای جریان رینولدز پایین است که محدود به کاربرد رایانه‌ای ابرکامپیوترها است. [۷۰].

با توجه به این‌که در این پایان‌نامه از روش RANS استفاده شده است، به این موضوع در قالب یک زیر فصل پرداخته می‌شود.

#### ۴-۷- مروری بر روش‌های RANS

معادلات RANS، معادلات متوسط زمانی برای حرکت جریان سیال هستند. ایده تشکیل‌دهنده این معادلات، تجزیه رینولدز است که به وسیله آن یک مقدار لحظه‌ای، به مقادیر متوسط زمانی و نوسانی خود تجزیه شده است. از معادلات RANS برای توصیف جریان‌های آشفته استفاده می‌شود. این معادلات بر اساس خواص جریان آشفته، تقریبی از حل‌های متوسط زمانی معادلات ناویر-استوکس ارائه می‌دهند. در اینجا به معرفی مختصر مهم‌ترین مدل‌های مربوط به این روش می‌پردازیم و از ارائه مدل‌های ریاضی آن‌ها به دلیل اینکه خارج از هدف اصلی این پایان‌نامه است، و نیز حجم زیادی را در برمی‌گیرد خودداری می‌شود. در شکل ۴-۸ مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار ANSYS FLUENT آورده شده است [۷۰].



شکل ۴-۸: مدل‌های آشفتگی موجود در ANSYS FLUENT [70].

تاکنون صدها مدل آشفتگی ارائه شده است که هر یک برای رژیم‌های خاص جریانی و حتی در ناحیه‌ای خاص از میدان جریان معتبر و دقیق می‌باشند. هدف نهایی تمام مدل‌های آشفتگی، محاسبه اندازه تنش رینولدز در نقاط مختلف جریان است. مدل‌های آشفتگی موجود را می‌توان از دو منظر بررسی کرد:

الف) روابط اساسی حاکم بر ویسکوزیته گردابه<sup>۱</sup>

ب) مدل‌های ویسکوزیته گردابه<sup>۲</sup>

۱- Eddy-Viscosity Constitutive Relation

۲- Eddy-Viscosity Model

روابط اساسی حاکم بر ویسکوزیته گردابه از یک متغیر منفرد که اصطلاحاً ویسکوزیته آشفته  $\mu_t$  نامیده می‌شود، برای بیان رابطه بین تنش‌های رینولدز موجود در معادلات RANS و پروفیل‌های موجود در میدان جریان متوسط، استفاده می‌کنند.

## ۴-۸- مدل استاندارد $k - \varepsilon$

مدل  $k - \varepsilon$  معروف‌ترین مدل دو معادله‌ای است زیرا درک آن آسان‌تر و استفاده از آن در برنامه‌نویسی ساده‌تر است. در مدل‌های ویسکوزیته گردابه  $k - \varepsilon$ ، میدان آشفستگی برحسب دو متغیر بیان می‌شود [۷۲]:

الف) انرژی جنبشی جریان آشفته  $K$

ب) نرخ اضمحلال (میرایی) ویسکوز انرژی جنبشی آشفته  $\varepsilon$

انرژی جنبشی لحظه‌ای جریان آشفته  $K(t)$ ، عبارت است از مجموع انرژی جنبشی متوسط (معادله

۳۵-۴) و انرژی جنبشی آشفته (معادله ۴-۳۶) [۱۶ و ۷۰].

$$K = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \quad (\text{معادله ۳۵-۴})$$

$$K = \frac{1}{2}(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (\text{معادله ۳۶-۴})$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\mu_t}{2\rho}\right)(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (\text{معادله ۳۷-۴})$$

می‌توان به کمک آنالیز ابعادی<sup>۳</sup> نشان داد که ویسکوزیته آشفته  $\mu_t$  را می‌توان به طول مقیاس

گردابه‌های بزرگ جریان آشفته مرتبط ساخت:

۱- Turbulent Kinetic Energy

۲- Viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy

۳- Dimensional Analysis

$$\mu_t \propto \rho u_l \delta_l \quad (\text{معادله ۴-۳۸})$$

که در آن  $u_l$  و  $\delta_l$  به ترتیب سرعت مقیاس و طول مقیاس بزرگ‌ترین گردابه‌ها در میدان جریان آشفته است. بعلاوه می‌توان نشان داد که  $u_l \propto \sqrt{k}$  و همچنین داریم  $\delta_l \propto \frac{\sqrt{k^3}}{\varepsilon}$  با جایگذاری این مقادیر در معادله ۴-۳۸ به معادله زیر می‌رسیم:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{معادله ۴-۳۹})$$

که در آن  $C_\mu$  یک ضریب تجربی است که مقدار آن را معمولاً برابر ۰/۰۹ در نظر می‌گیرند. در مدل استاندارد  $\varepsilon - k$  مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  توسط معادله‌های نیمه تجربی زیر به دست می‌آیند.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_{,j} = \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_{,j} \right)_{,j} + G + B - \rho \varepsilon \quad (\text{معادله ۴-۴۰})$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_{,j} = \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_{,j} \right)_{,j} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{معادله ۴-۴۱})$$

که در آن  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_3$  ضرایب تجربی بوده و  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  به ترتیب اعداد پرانتل و اشمیت آشفته می‌باشند. عبارات  $G$  و  $C_1 \left( \frac{\varepsilon}{k} \right)$  در معادله ۴-۴۱ به ترتیب بیانگر فرآیندهای تولید برشی<sup>۱</sup>  $\varepsilon$  و فرآیندهای اضمحلال ویسکوز  $\varepsilon$  می‌باشند. عبارت  $C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B$  بیانگر اثرات بویانسی است. در معادله ۴-۴۰ عبارت  $G$  بیانگر میزان تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از اندرکنش بین جریان متوسط<sup>۲</sup> و میدان جریان آشفته می‌باشد و از همین رو به آن اصطلاحاً عبارت تولید برشی گفته می‌شود. عبارت  $B$  نیز بیانگر تولید اتلاف بویانسی ناشی از میدان چگالی نوسان کننده جریان<sup>۳</sup> می‌باشد. روابط صریح<sup>۴</sup> برای  $G$  و  $B$  به صورت زیر هستند:

---

۱- Shear Generation Processes

۲- Mean Flow

۳- Fluctuating Density Field

۴- Exact Reactions

$$G = -\overline{\rho u'_i u'_j u_{i,j}} \quad (\text{معادله ۴-۴۲})$$

$$B = \overline{\rho' u'_i g_i} \quad (\text{معادله ۴-۴۳})$$

رابطه بوزینسک<sup>۱</sup> بر پایه این اصل بنا نهاده شده است که مؤلفه تنش‌های رینولدز متناسب با گرادیان‌های سرعت متوسط می‌باشند. یعنی داریم:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (\text{معادله ۴-۴۴})$$

با قرار دادن معادله فوق در معادله ۴-۴۲ داریم:

$$G \approx \mu_t (u_{i,j} + u_{j,i}) u_{i,j} \quad (\text{معادله ۴-۴۵})$$

پارامتر  $B$  را می‌توان با استفاده از تقریب ویسکوزیته گردابه که در آن شار آشفته چگالی نوسان کننده<sup>۲</sup> برحسب گرادیان‌های چگالی متوسط به دست می‌آید، مدل نمود.

$$B \approx -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} \rho_{,i} g_i \quad (\text{معادله ۴-۴۶})$$

که در آن  $\sigma_p$  عدد اشمیت و پرانتل جریان آشفته چگالی می‌باشند. برای جریان‌های چگالی ثابت، عبارت بویانسی با استفاده از تقریب بوزینسک به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$B = g, \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_t} \beta_T T_{,i} + \frac{\mu_t}{S_t} \beta_C C_{,i} \right] \quad (\text{معادله ۴-۴۷})$$

## ۹-۴- تعیین نواحی سلول و شرایط مرزی

برای تعیین کامل هر مسئله CFD، باید نواحی سلول و شرایط مرزی تعیین شود. نواحی سلول به وسط شبکه سلولی اشاره دارد و عموماً بیانگر این امر است که چه سیالی در آن سلول قرار دارد [۷۰].

۱- Boussinesq

۲- Turbulent Flux of Fluctuating Density



برای تعیین شرایط مرزی باید جایی که سیال دامنه را ترک و یا به آن وارد می‌شود، تعیین گردد. در مرزهای ورودی باید مقادیر سرعت، فشار یا دما تعیین شود. در سایر مرزها مانند دیوارها باید نرمی و زبری و وجود انتقال حرارت تعیین شود. همچنین ممکن است مرزهای تقارن، تناوب یا محوری در مدل وجود داشته باشد. داده‌های مورد نیاز در یک مرز به نوع شرایط مرزی مدل‌های فیزیکی به کاررفته بستگی دارد [۷۰].

#### ۴-۹-۱- نواحی سلولی سیال

یک ناحیه سلولی سیال<sup>۱</sup>، مجموعه سلول‌هایی است که برای آن‌ها تمام معادلات فعال شده، حل می‌شوند. برای حل معادلات، انتخاب جنس سیال موردنیاز است. برای جریان‌های چند فازی نیاز به تعیین ماده نیست. در عوض ناحیه مایع شامل مخلوطی از فازها است. در مدل مربوط به این پایان‌نامه نواحی سلول، سیال انتخاب شده و نوع سیال را هوا در نظر گرفتیم.

#### ۴-۹-۲- نواحی سلولی جامد

ناحیه سلول جامد<sup>۲</sup>، مجموعه‌ای از سلول‌هایی است که برای آن‌ها فقط معادله انرژی حل می‌شود. در واقع جابجایی در جامد دیده نمی‌شود. تنها ورودی موردنیاز نام ماده است (که در کادر محاوره مواد تعریف شده است). ورودی‌های دلخواه، امکان تنظیم نرخ حجمی تولید حرارت (منبع حرارتی) را می‌دهند. در صورتی نیاز به تعیین محور دوران دارید که مرز دوار، مجاور ناحیه جامد باشد علاوه بر این برای یک ناحیه جامد می‌توان حرکت تعریف نمود [۷۰].

#### ۴-۹-۳- شرایط مرزی

خلاصه‌ای از انواع شرایط مرزی که در نرم‌افزار ANSYS FLUENT وجود دارد در جدول ۴-۱ آورده شده است [۷۰].

---

۱- Fluid-cell Zone

۲- Solid-cell Zone

جدول ۴-۱: شرایط مرزی موجود در ANSYS FLUENT و ویژگی‌های آن‌ها [۷۰].

ویژگی	شرط مرزی
این شرط مرزی برای هر دو جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر مناسب است و هنگامی که فشار ورودی معلوم بوده ولی سرعت و دبی نامشخص است استفاده می‌شود. پارامترهای ورودی موردنیاز بر اساس نوع مسئله می‌تواند متفاوت باشد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: نوع مرجع، فشار کلی، دمای کلی، جهت جریان، فشار استاتیک، پارامترهای توربولانس، پارامترهای تشعشع و ... .	Pressure Inlet
برای جریان‌های تراکم ناپذیر نتایج خوبی ارائه می‌دهد و در مورد جریان‌های تراکم پذیر نتایج تا حدودی قابل قبول است. با استفاده از بزرگی و جهت مؤلفه‌های سرعت و یا بزرگی سرعت عمود بر مرز می‌توان سرعت ورودی را تعیین کرد.	Velocity Inlet
برای جریان‌های تراکم پذیر بکار می‌رود زیرا در جریان تراکم پذیر با ثابت بودن سرعت، دبی جرمی نیز مشخص است؛ باین وجود برای جریان‌های تراکم ناپذیر نیز به کار برده می‌شود. در صورتی که همه فازهای جریان تراکم چند فازی غیرقابل تراکم باشند نمی‌توان از این شرط استفاده کرد.	Mass-Flow Inlet
جهت مدل کردن مجرای ورودی با ضریب افت، جهت جریان دما و فشار محیط استفاده می‌شود.	Inlet Vent
جهت مدل کردن ورودی و خروجی فن با افزایش فشار، جهت جریان، دما و فشار محیط استفاده می‌شود.	Intact Fan
این شرط مرزی به فشار استاتیکی (نسبی) در مرز خروجی احتیاج دارد. این شرط مرزی برای هر دو جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر مناسب است	Pressure Outlet
برای مرزهای دیوار از این شرط استفاده می‌شود. می‌توان شرایط دمایی و انتقال حرارت را برای دیوارها مشخص کرد و در صورتی که یک دیوار متحرک باشد، می‌توان این ویژگی را برایش در این شرط مرزی اعمال کرد.	Wall
برای کاهش اندازه کلی مش به کار می‌رود. برای استفاده از این شرط باید میدان جریان و هندسه متقارن باشد.	Symmetry & Axis
در صورتی که هیچ اطلاعاتی از فشار یا سرعت در خروجی در دسترس نباشد از این شرط مرزی در خروجی استفاده می‌شود. داده‌های موجود در سطح خروجی از مقادیر داخلی استنباط می‌گردد. این نوع شرط مرزی درجایی مناسب است که جریان توسعه یافته باشد.	Outflow

شرایط مرزی در ANSYS FLUENT به صورت زیر دسته‌بندی می‌شود [۷۰]:

- **شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان:** سرعت ورودی، فشار ورودی، جریان جرمی ورودی، فشار خروجی، فشار در ناحیه دور، جریان خروجی، درپچه ورودی، ورودی فن، درپچه ورودی و خروجی فن.
- **شرایط مرزی دیواره، قطبی و تکراری:** دیوار (Wall)، تقارن (Symmetry)، پریودیک (Periodic) و محور (Axis).
- **شرایط مرزی صفحه داخلی:** فن، رادیاتور و دیوار.

هر یک از شرایط مرزی ویژگی‌های مخصوص خود را دارد که این ویژگی‌ها مربوط به شرایط فیزیکی ابعاد و پارامترهای جریان سیال و موارد مربوط به آشفتگی است. ویژگی‌های مربوط به شرایط مرزی در تعیین جواب نهایی مدل CFD مؤثر می‌باشند بنابراین باید در تعیین و وارد کردن آن‌ها به نرم‌افزار دقت کافی را به عمل آوریم.

#### ۴-۱۰- روش‌های حل مسئله (اصول حل گری)

دو نوع حل گر در نرم‌افزار ANSYS FLUENT وجود دارد که عبارت‌اند از؛ حل گر مبتنی بر فشار<sup>۱</sup> و حل گر مبتنی بر چگالی<sup>۲</sup> هر دو نوع حل گر می‌تواند در دامنه وسیعی از جریان‌ها استفاده شود ولی در برخی از این موارد، گونه‌ای از این حل گرها می‌تواند بهتر عمل کند. حل گر مبتنی بر فشار برای جریان‌های غیرقابل تراکم و نسبتاً قابل تراکم استفاده می‌شود؛ درحالی‌که حل گر مبتنی بر چگالی برای جریان‌های سرعت‌بالای قابل تراکم استفاده می‌شود [۷۰].

---

۱- Pressure-based

۲- Density-based

دو روش صریح<sup>۱</sup> و ضمنی<sup>۲</sup> برای حل گر مبتنی بر چگالی وجود دارد. روش ضمنی در مسائل حالت پایدار دارای همگرایی سریع‌تری نسبت به روش صریح است در حالی که روش ضمنی نیاز به حافظه بیشتری نیز دارد. گزینه ضمنی عموماً بر صریح اولویت دارد زیرا محدوده دقیق‌تری در بازه‌های زمانی دارد [۷۰].

دو الگوریتم منفک<sup>۳</sup> و کوپل<sup>۴</sup> برای حل گر مبتنی بر فشار وجود دارد. در الگوریتم منفک معادلات حاکم بر جریان سیال به صورت مجزا به ترتیب حل می‌شود ولی در الگوریتم کوپل معادله‌های مومنتوم و پیوستگی به صورت هم‌زمان باهم حل می‌شود. الگوریتم کوپل دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به روش منفک است ولی به حافظه بیشتری نیاز دارد. حل گر کوپل مبتنی بر فشار برای بیشتر جریان‌های تک فاز قابل اعمال بوده و عملکرد بهتری را نسبت به حل گر منفک مبتنی بر فشار از خود نشان می‌دهد ولی برای جریان‌های چند فازی (اویلری)، جریان جرمی متناوب و NITA<sup>۵</sup> قابل استفاده نیست و ۱/۵ الی ۲ برابر حافظه بیشتر، نسبت به حل گر منفک، نیاز دارد. حل گر مبتنی بر فشار برای مدل مربوط به این پایان‌نامه انتخاب شده است.

#### ۴-۱۰-۱- روش‌های درون‌یابی برای پارامتر جابجایی

در ANSYS FLUENT متغیرهای حل گر در مرکز سلول‌های شبکه (حجم کنترل) ذخیره می‌شود. به صورت پیش‌فرض نرم‌افزار ANSYS FLUENT مقادیر تفکیک شده مربوط به هر پارامتر را در مرکز سلول ذخیره می‌کند ولی جهت به دست آوردن پارامترهای جابجایی در معادله ناویر-استوکس نیاز است این مقادیر روی صفحات به دست آیند؛ بنابراین باید این مقادیر از روش درون‌یابی محاسبه شوند.

---

۱- Explicit

۲- Implicit

۳- Segregated

۴- Coupled

۵- Non-iterative Transient Advancement

روش‌های درون‌یابی برای متغیرهای مربوط به معادله انتقال در ANSYS FLUENT به شرح زیر می‌باشند [۷۰].

**First-Order Upwind:** این روش دارای دقت از مرتبه اول است و از سایر روش‌های درون‌یابی ساده‌تر همگرا می‌شود. هنگامی که از این روش استفاده می‌شود مقادیر در صفحه برابر مقادیر در مرکز سلول در بالادست جریان است.

**Power Law:** برای جریان‌های با عدد رینولدز کمتر از ۵ این روش از مدل مرتبه اول دقیق‌تر است. برای به دست آوردن مقادیر کمیت‌ها در صفحه با این روش از حل دقیق استفاده می‌گردد.

**Secend-Order Upwind:** با این روش مقادیر در صفحات با استفاده از مدل خطی چندبعدي انجام می‌پذیرد. این روش دارای دقت مرتبه ۲ است و به‌ویژه برای مش‌های مثلثی در مدل دوبعدی و هرم با قائده سه وجهی در مدل سه‌بعدي یا مشی که با جهت جریان هم‌جهت نیست مناسب‌تر است.

**First-to-Higher Order Blending:** با استفاده از روش‌های مراتب بالا دقت افزایش خواهد یافت ولی همگرایی سخت‌تر شده و ناپایداری افزایش می‌یابد. همچنین روش‌های مرتبه اول دقت مورد انتظار را نخواهد داشت.

**Central-Differencing Scheme:** روش تفکیک با دقت مرتبه دوم است که در مدل توربولانس LES قابل استفاده است. این روش دقت حل را در محاسبات LES افزایش می‌دهد.

**MUSCL<sup>۱</sup>:** این روش برای گسسته سازی مرتبه سوم در مش‌های غیر ساختاری و نامنظم استفاده می‌شود. در جریان‌هایی که دارای جریان‌های ثانویه و گردابی هستند دارای دقت بیشتری می‌باشند.

---

<sup>۱</sup> - Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws

**QUICK<sup>۱</sup>**: این روش برای مش‌های مربعی، مکعبی و هیبرید قابل‌اعمال بوده و برای جریان‌های دورانی-چرخشی مفید است و روی مش یکنواخت نیز دارای دقتی از مرتبه سوم را دارد.

#### ۴-۱۱-۲- روش‌های درونیابی برای گرادیان‌ها

گرادیان‌ها متغیرهای حل برای محاسبه کمیت‌های دیفیوژن و مشتقات سرعت و گسسته سازی‌های مراتب بالاتر موردنیاز هستند. گرادیان‌های متغیرهای حل با استفاده از سه روش زیر تعیین می‌شوند [۷۰].

**Green-Gauss Cell-Based**: این روش، روش پیش‌فرض نرم‌افزار است. ازجمله مشکلات این روش این است که ممکن است در حل باعث ایجاد دیفیوژن اشتباه شود و میدان جریان را به هم بریزد.

**Green-Gauss Node-Based**: این روش نسبت به روش قبلی دقیق‌تر است و دیفیوژن اشتباه را به حداقل می‌رساند. این روش برای مش‌های مثلثی در مدل دوبعدی و هرمی با قائده سه وجهی در مدل سه‌بعدی مناسب است.

**Least-Squares Cell-Based**: برای مش‌های چندوجهی توصیه می‌شود. این روش دقتی برابر با دقت روش Green-Gauss Node-Based را دارد و خواصی مانند گرادیان‌های گره‌ای را دارد و زمان محاسبات آن کمتر است.

#### ۴-۱۰-۳- روش‌های درونیابی برای فشار

هنگامی که از حل گر مبتنی بر فشار در نرم‌افزار ANSYS FLUENT استفاده می‌کنیم روش‌های درونیابی خاص فشار فعال می‌شوند که عبارت‌اند از [۷۰]:

**Standard**: این روش طرح پیش‌فرض نرم‌افزار است. استفاده از این روش برای جریان‌هایی که مرزها دارای گرادیان شدید فشار هستند موجب کاهش دقت حل می‌شود. در جریان‌های با نیروی حجمی

---

۱- Quadratic Upwind Interpolation

بزرگ مانند جریان‌های چرخشی قوی و جابجایی طبیعی با عدد رایلی<sup>۱</sup> بالا امکان استفاده از این روش وجود ندارد. در این موارد باید مش ناحیه گرادیان بالا ریزتر شده تا متغیر فشار به‌طور مناسب دوباره حل شود.

**PRESTO<sup>۲</sup>**: این روش برای جریان‌های به‌شدت چرخشی و جریان‌هایی که شامل گرادیان‌های فشار شدید هستند مانند محیط متخلخل، مدل فن و ... یا در دامنه‌های به‌شدت خمیده به کار می‌رود.

**Liner**: روش خطی مقدار فشار روی صفحه را با استفاده از میانگین مقادیر فشار در سلول‌های مجاور محاسبه می‌نماید. این روش هنگامی به کار می‌رود که سایر گزینه‌ها مشکلات همگرایی یا رفتار غیر فیزیکی از خود نشان دهند.

**Secend-Order**: این روش برای جریان‌های تراکم پذیر بکار برده می‌شود و نباید با محیط متخلخل جریان‌های دارای گرادیان فشار ناپیوسته ضربه‌ای، فن‌ها یا مدل‌های چند فازی مخلوط و یا جدا بکار برده شود.

**Body Force Weighted**: این روش هنگامی بکار برده می‌شود که نیروهای حجمی بزرگ باشند. برای مثال می‌توان به جابجایی طبیعی با عدد رایلی بالا یا جریان‌های به‌شدت چرخشی اشاره کرد.

## ۴-۱۰-۴- کوپلینگ فشار-سرعت

منظور از کوپلینگ فشار-سرعت<sup>۳</sup> الگوریتم عددی است که هنگام استفاده از حل گر مبتنی بر فشار از ترکیب معادله پیوستگی و مومنتوم برای به دست آوردن معادله‌ای برای فشار یا اصلاح فشار استفاده می‌کند. این روش می‌تواند به‌صورت منفک یا کوپل شده باشد. در ANSYS FLUENT پنج الگوریتم وجود دارد که در زیر به معرفی آن‌ها می‌پردازیم [۷۰].

---

۱- Rayleigh

۲- Pressure Staggering Option

۳- Pressure-Velocity Coupling

**1-SIMPLE:** در این روش رابطه بین سرعت و فشار تصحیح گردیده تا قانون بقای جرم اجرا شود و میدان فشار به دست آید. معادله مومنتوم در این روش با حدس میدان فشار حل می‌شود.

**2-SIMPLEC:** این روش امکان همگرایی سریع‌تر را برای مسائل ساده مثل جریان‌های آرام بدون مدل فیزیکی خاص فراهم می‌کند. در جریان‌های پیچیده و توربولانس در صورتی که تنها محدودیت کوپل فشار-سرعت وجود داشته باشد این الگوریتم در همگرایی سریع‌تر مفید خواهد بود.

**3-PISO:** این روش برای جریان‌های تراکم پذیر گذرا بکار می‌رود و دارای یک مرحله پیش‌بینی و دو مرحله تصحیح است. برای افزایش بازدهی محاسبات الگوریتم PISO دو تصحیح را در نظر می‌گیرد، تصحیح همسایه<sup>۴</sup> و تصحیح کشیدگی<sup>۵</sup>. این الگوریتم حافظه پردازش بیشتری در هر تکرار استفاده می‌کند ولی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی تعداد تکرار جهت همگرایی را به‌ویژه در مسائل گذرا کاهش دهد. این الگوریتم به‌شدت در مسائل گذرا به‌ویژه هنگامی که گام زمانی بزرگ است توصیه می‌شود.

**6-FSM:** این روش هنگامی استفاده می‌شود که طرح مستقل از زمان باشد. در مسائل مستقل از زمان این روش هزینه‌های محاسباتی پایینی دارد.

**Copled:** الگوریتم مبتنی بر فشار کوپل برای جریان‌های حالت پایای تک فاز مناسب و قوی است.

در این پایان‌نامه برای حل مدل تهویه مترو از روش Secend-Order Upwind برای درون‌یابی پارامتر جابجایی، از روش Least-Squares Cell-Based برای گرادیان‌ها، روش Secend-Order برای درون‌یابی فشار و درنهایت از روش SIMPLE برای کوپلینگ فشار سرعت استفاده شده است.

---

۱- Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

۲- SIMPLE-Consistent

۳- Pressure-Implicit With Splitting of Operators

۴- Neighbor Correction

۵- Skewness Correction

۶- Fractional Step Method



## ۴-۱۱- همگرایی

برای همگرایی یک مسئله باید تعداد تکرارها به اندازه کافی باشد. به طور کلی می توان بیان کرد که برای همگرایی موارد زیر باید برقرار باشد [۷۰].

- با تکرارهای بیشتر حل تغییر نکند.
  - تعادل برای جرم کلی، مومنتوم، انرژی و مقادیر اسکالر حاصل شود.
  - تمام معادلات (مومنتوم، انرژی و غیره) در تمام سلولها به اندازه ترانس معینی برقرار شوند.
- می توان با استفاده از تاریخچه باقیماندهها، همگرایی را بررسی نمود. معمولاً کاهش سه برابری باقیماندهها نشان دهنده همگرایی کیفی است. باقیمانده انرژی برای حل گر مبتنی بر فشار در حالت ایده‌ال تا  $10^{-6}$  کاهش می‌یابد ولی باقیمانده اجزا<sup>۱</sup> ممکن است نیاز به کاهشی تا  $10^{-5}$  داشته باشند تا به تعادل برسند.

## ۴-۱۲- تولید شبکه (Mesh)

یکی از مسائل اصلی در حل عددی معادلات با مشتقات جزئی ایجاد شبکه‌بندی مناسب است. با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب می توان حل یک سیستم معادلات دیفرانسیل را تا حد زیادی ساده نمود و بالعکس انتخاب نامناسب محل نقاط شبکه می تواند باعث ناپایداری یا عدم همگرایی در محاسبات شود [۱۶].

سابقاً روش تفاضل محدود فقط برای مسائلی استفاده می شد که این توانایی وجود داشت تا سیستم مختصات مناسبی در آنها اختیار شود چراکه معادلات حاکم را در این سیستم می توان حل کرد. هم‌زمان با پیشرفت در محاسبه میدان‌های پیچیده، نگاهت‌ها جهت انتقال دامنه فیزیکی به دامنه محاسباتی

---

۱- Species Residual

بکار گرفته شد. برای مثال سطح جسم را می‌توان همانند یک لایه در صفحه محاسباتی در نظر گرفت و به راحتی به عنوان شرایط مرزی سطحی بکار برد. عموماً تبدیلات طوری مورد استفاده قرار می‌گیرند که یک فضای شبکه‌ای یکنواخت و همگن را ایجاد می‌نمایند. در حالی که نقاط در فضای فیزیکی همگن نیستند [۱۶].

#### ۴-۱۲-۱- خواص شبکه

مسئله ایجاد شبکه در حقیقت تعیین یک نگاشتی است که نقاط شبکه را از دامنه فیزیکی به دامنه محاسباتی می‌برد. شرایط لازم برای چنین نگاشتی عبارت‌اند از [۱۶]:

- (۱) نگاشت می‌بایست یک‌به‌یک باشد.
  - (۲) خطوط شبکه می‌بایستی صاف باشند و مشتقات پیوسته‌ای را ایجاد نمایند.
  - (۳) نقاط شبکه بایستی به اندازه‌ای به هم نزدیک باشند که دامنه فیزیکی خطاهای زیادی را ایجاد نکند.
  - (۴) از انحنای زیاد خطوط گره‌ها باید جلوگیری شود.
- ایجاد شبکه مناسب در حالت یک‌بعدی تقریباً ساده است. توابع زیادی وجود دارند که می‌توانند برای ایجاد شبکه به نحو مناسبی مورد استفاده قرار گیرند. در حالت یک‌بعدی مسائل مرزی پیچیده ممکن است اتفاق نیافتد، به همین دلیل بیشتر تلاش‌ها در زمینه ایجاد شبکه در حالت دوبعدی انجام می‌شود. ایجاد شبکه در حالت سه‌بعدی بسیار پیچیده است که امروزه کامپیوترهای قوی و برنامه‌های کامپیوتری مناسب این مشکل را ساده کرده‌اند.

#### ۴-۱۲-۲- شبکه‌بندی با استفاده از کامپیوتر

امروزه به کمک نرم‌افزارها می‌توان شبکه‌های سه‌بعدی مناسبی را ایجاد نمود. در این مطالعه از نرم‌افزار ANSYS Meshing برای شبکه‌بندی مدل استفاده شده است. فرایند شبکه‌بندی در این نرم‌افزار به ترتیب شامل مراحل زیر است [۷۳].

(۱) تنظیم روش شبکه‌بندی

(۲) تعیین تنظیمات شبکه‌بندی کلی

(۳) تعیین تنظیمات شبکه‌بندی محلی

(۴) پیش‌نمایش و ایجاد شبکه







(۵) چک کردن کیفیت شبکه

در ANSYS Meshing شش روش برای شبکه‌بندی اجسام سه‌بعدی و چهار روش برای اجسام

دو بعدی وجود دارد که در جدول ۲-۴ و شکل ۴-۹ آورده شده است.

جدول ۲-۴: روش‌های شبکه‌بندی [۷۳].

شبکه سه‌بعدی	شبکه دو بعدی
Automatic	Automatic
Triangles	Multi Zone
Uniform Quad /Tri	Hex Dominant
Uniform Quad	Tetrahedron
	Sweep
	Cut Cell

مش دوبعدی		مش سه‌بعدی	
<b>Quadrilateral</b> (Quad)		<b>Hexahedral</b>	
		<b>Tetrahedral</b>	
<b>Triangle</b> (Tri)		<b>Prismatic(wedge)</b>	
		<b>Pyramidal</b>	

شکل ۴-۹: انواع شبکه در حالت دوبعدی و سه‌بعدی [۷۳].

#### ۴-۱۲-۳- کیفیت شبکه

شبکه‌بندی مناسب در کاهش خطاهای حل گر که منجر به نتایج نادرست یا غیردقیق می‌شود نقش بسیار مهمی دارد. شبکه خوب دارای سه مؤلفه وضوح خوب، توزیع شبکه مناسب و کیفیت شبکه خوب است. دو مؤلفه اول بستگی به تمامی فرایندهای شبکه‌بندی (روش‌های شبکه‌بندی، سائز شبکه، بهبود محلی شبکه و ..) و استراتژی کاربر در شبکه‌بندی برای یک تحلیل ویژه را دارد. ANSYS Meshing کیفیت شبکه را با استفاده از ابزارهای مختلف کمی می‌نماید که مهم‌ترین آن‌ها معیار کیفیت تعامد<sup>۱</sup> و معیار کشیدگی<sup>۲</sup> هستند.

#### ۴-۱۲-۳-۱- کیفیت تعامد

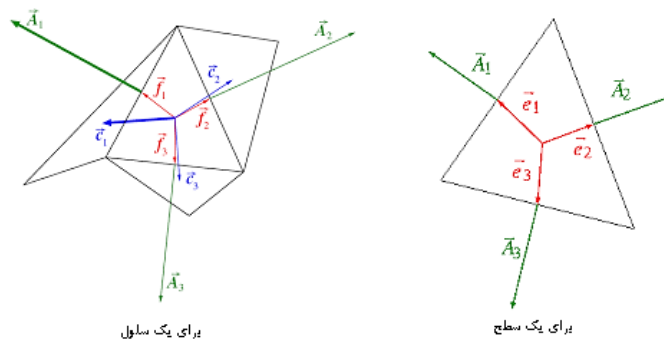
بازه کیفیت تعامد بین صفر تا یک است که مقدار صفر، بیانگر بدترین و مقدار یک، بیانگر بهترین حالت است. معیار کیفیت تعامد با استفاده از بردار نرمال سطح ( $A_i$ )، بردار مرکز سلول به مرکز هریک از سلول‌های مجاور ( $C_i$ ) و بردار مرکز سلول به هر وجه ( $f_i$ ) برای یک سلول به صورت مقدار مینیمم  $\frac{A_i \cdot C_i}{|\vec{A}_i| |\vec{C}_i|}$  و  $\frac{A_i \cdot f_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|}$  برای هر وجه  $i$  محاسبه می‌شود. این معیار برای وجه به صورت مقدار مینیمم

۱- Orthogonal Quality

۲- Skewness

برای هر لبه  $i$  محاسبه می‌شود که  $e_i$  برداری از مرکز وجه با مرکز لبه است. در جدول ۳-۴  $\frac{A_i \cdot e_i}{|\vec{A}_i| |\vec{e}_i|}$

نحوه ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از روش کیفیت تعامد آورده شده است [۷۳].



شکل ۴-۱۰: نمایش بردارها و سلول در محاسبه کیفیت تعامد [۷۳].

جدول ۳-۴: ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار تعامد [۷۳].

توصیف کیفی تعامد	عالی	بسیار خوب	خوب	قابل قبول	بد	غیر قابل قبول
توصیف کمی تعامد	۰/۹۵-۱	۰/۷-۰/۹۵	۰/۲-۰/۷	۰/۱-۰/۲	-۰/۱ ۰/۰۰۱	۰-۰/۰۰۱

#### ۴-۱۲-۳-۲- کشیدگی

معیار کشیدگی تعیین می‌کند که یک شبکه‌بندی چقدر به ایده آل نزدیک است. دو روش برای تعیین

کشیدگی وجود دارد؛ روش انحراف حجمی معادل<sup>۱</sup> و روش انحراف زاویه نرمال شده<sup>۲</sup> [۷۳].

روش انحراف حجمی معادل تنها برای المان‌های مثلثی و Tetrahedrons اعمال می‌شود در این روش

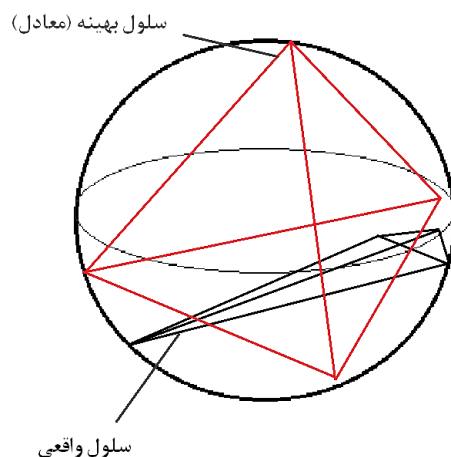
کشیدگی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{کشیدگی} = \frac{\text{سایز سلول} - \text{سایز بهینه سلول}}{\text{سایز بهینه سلول}}$$

سایز بهینه سلول عبارت است از سایز یک سلول متساوی‌الاضلاع با همان شعاع محاطی.

۱- Equilateral Volume Deviation

۲- Normalized Angle Deviation



شکل ۴-۱۱: توصیف سلول واقعی و سلول بهینه [۷۳].

در روش انحراف زاویه نرمال کشیدگی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{کشیدگی} = \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right]$$

در معادله فوق  $\theta_{max}$  بزرگترین زاویه در سطح یا سلول،  $\theta_{min}$  کوچکترین زاویه در سلول و  $\theta_e$  زاویه معادل سطح یا سلول است ( $\theta_e$  برای مثلث و حرم ۶۰ درجه و برای مکعب و چهارضلعی ۹۰ درجه است). طیف ارزیابی کشیدگی در جدول ۴-۴ آورده شده است [۷۳].

جدول ۴-۴: ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار کشیدگی [۷۳].

توصیف کیفی کشیدگی	غیر قابل قبول	بد	قابل قبول	خوب	بسیار خوب	عالی
توصیف کمی کشیدگی	۰/۹۸-۱	۰/۹۵-۰/۹۷	۰/۸۰-۰/۹۴	۰/۵۰-۰/۸۰	۰/۲۵-۰/۵۰	۰-۰/۲۵

#### ۴-۱۲-۳-۳- استقلال از شبکه

خیلی مهم است که اطمینان حاصل شود که شبکه‌بندی انجام‌شده موجب جواب صحیح خواهد شد. برای اعتماد به نتیجه باید حل، مستقل از شبکه باشد. به این معنی که حل با اصلاح شبکه تغییر نکند. برای بررسی استقلال از شبکه باید مراحل زیر را طی کنیم [۷۳]:

- ۱) شبکه ریزتر ایجاد شود.
- ۲) به مرحله اعمال شبکه بازگشته و به صورت دستی شبکه تنظیم شود.
- ۳) از توانایی سازگاری مبتنی بر حل در ANSYS FLUENT استفاده شود.
- ۴) لیست‌های سازگاری شبکه ایجاد شود.
- ۵) محاسبات تا همگرایی انجام شود.
- ۶) نتایج حاصله روی مش‌های متفاوت مقایسه شود.
- ۷) فرایند در صورت نیاز تکرار شود.

#### ۴-۱۳- جمع‌بندی

برای حل یک مسئله دینامیک سیالاتی با استفاده از روش CFD ابتدا باید مفاهیم اولیه دینامیک سیالات را به خوبی آموخته باشیم. آموختن روش‌های حل مسئله به ما این امکان را می‌دهد که مسئله CFD را به بهترین روش و با صرف کمترین هزینه و زمان انجام دهیم. با توجه به این که مسئله مربوط به این پایان‌نامه یک مسئله تهویه است، علاوه بر شناخت معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت، باید شناخت کافی در مورد آشفتگی و معادلات حاکم بر آن را داشته باشیم. درک صحیح از علم دینامیک سیالات به ما این امکان را می‌دهد تا در حل مسئله با استفاده از نرم‌افزارهای موجود، تنظیمات حل گری و داده‌های ورودی را به بهترین شکل شناسایی و انجام دهیم.

یک مسئله CFD با مدل سازی مسئله آغاز می شود. چنانچه هندسه مدل به خوبی طراحی شده باشد در مراحل بعدی مشکلات کمتری وجود خواهد داشت و جواب مسئله واقعی تر خواهد بود. البته باید گفت که در رابطه با جواب نهایی مسئله به ترتیب نوع شبکه بندی و کیفیت آن، فیزیک مسئله و در ادامه نحوه حل آن تعیین کننده کیفیت گذارشات نهایی می باشند.

با توجه با آنچه در این فصل آمده، درک بهتری را از فصل پیش رو خواهیم داشت و در فصل بعدی به نحوه انجام کار و حل مدل CFD می پردازیم.





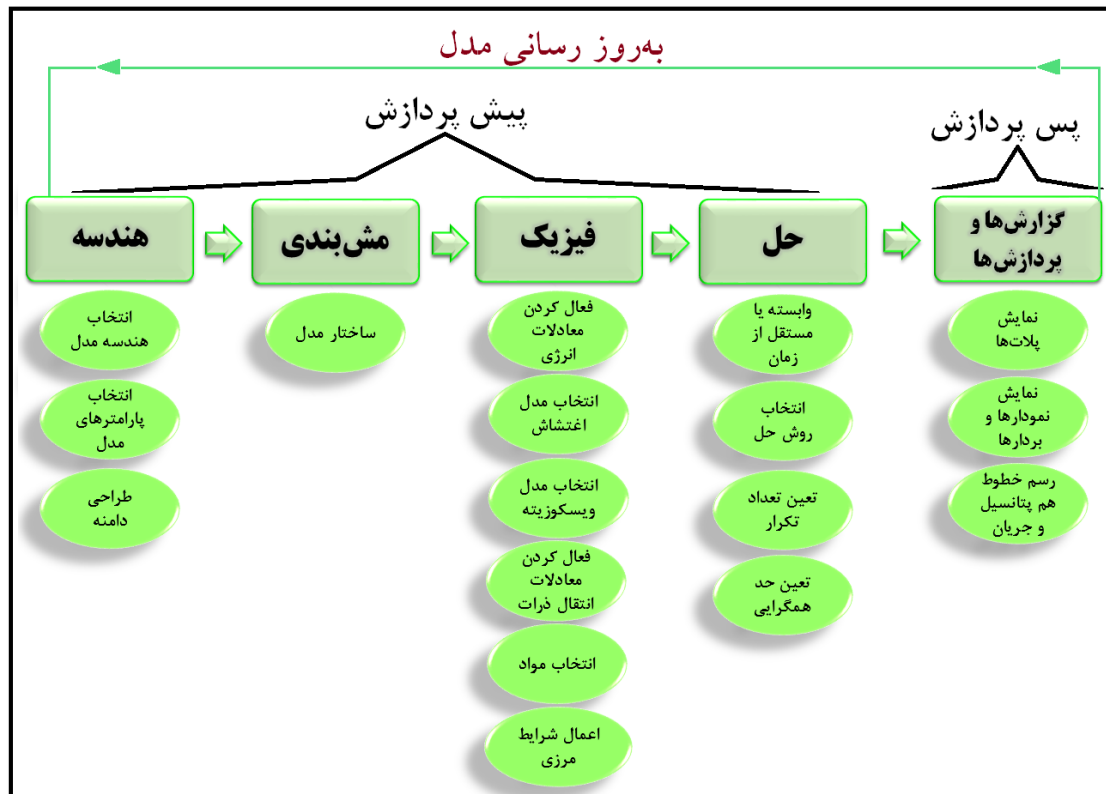
# فصل پنجم

طراحی سیستم تهویه مترو با استفاده از مدل سازی *CFD*

در این فصل مسیر رسیدن به هدف شرح داده می‌شود. با توجه به عنوان این پایان‌نامه یعنی "طراحی سیستم تهویه خط ۲ مترو مشهد با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی" ابتدا نیاز به شناخت سیستم تهویه مترو، و در مرحله بعد نیاز به نحوه حل مسئله به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، است. تهویه مترو و موارد مربوط به آن در فصل سوم این پایان‌نامه آورده شده است. بدون شناخت کافی از علم دینامیک سیالات محاسباتی حل مسئله مربوط به این پایان‌نامه با روش CFD غیرممکن است؛ از این جهت در فصل چهارم آنچه از علم دینامیک سیالات محاسباتی لازم بوده آورده شد.

خط ۲ مترو مشهد شامل ۱۲ ایستگاه زیرزمینی است که تمام این ایستگاه‌ها شبیه به هم طراحی و ساخته شده‌اند. ۶ ایستگاه از این خط به بهره‌برداری رسیده است و با توجه به این که ایستگاه‌ها تماماً شبیه به هم هستند می‌توانیم طراحی را برای یک ایستگاه انجام داده و نتایج به کل خط و ایستگاه‌ها تعمیم داده شد. در مراحل طراحی ابتدا به بررسی مقدار هوای لازم و مشخص شدن فن‌های سیستم تهویه و ویژگی آن‌ها پرداخته شد و در ادامه حالات مختلف دمایی در فصل‌های مختلف سال و شرایط آسایش حرارتی در مترو بررسی شد. اعتبار سنجی نتایج در مرحله تعیین هوای مورد نیاز با طرح اجرایی شرکت زیترن انجام شد و اعتبار سنجی مربوط به سرعت و دمای محیط با استفاده از دستگاه سرعت سنج و دما سنج انجام شده است.

طراحی سیستم تهویه با استفاده از علم CFD نیاز به استفاده از کامپیوتر قوی و نرم‌افزار شبیه‌سازی مناسب دارد. در این تحقیق از نرم‌افزار ANSYS Workbench استفاده شد. برای طراحی سیستم تهویه با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Workbench باید مراحل را که در شکل ۵-۱ آورده شده‌اند را طی کنیم.



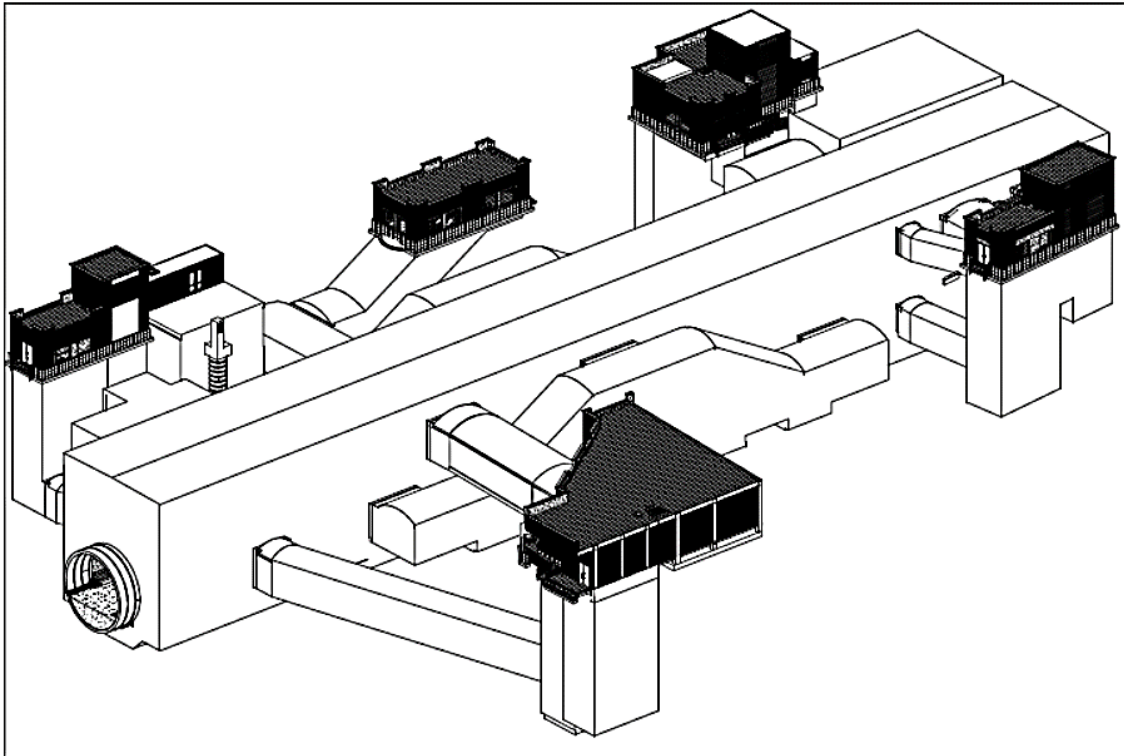
شکل ۵-۱: مراحل انجام پروژه.

## ۲-۵- ساخت هندسه مدل

هندسه مدل مربوط به یکی از ایستگاه‌های خط ۲ مترو مشهد است. نقشه‌های مربوط به ایستگاه به صورت فایل‌های CAD دریافت شد و طراحی مدل اولیه برای مش بندی و حل، از روی این نقشه‌ها صورت پذیرفت. نقشه سه بعدی مربوط به ایستگاه در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. مدل نهایی بدون تغییر در ابعاد، با همان ابعاد واقعی ساخته شده است. چندین مرحله این مدل اصلاح شد و در نهایت برای تحلیل دو مدل جدا از هم ساخته شد. هندسه اول مربوط به اتاق تاسیسات است که تهویه آن به صورت جدا از سیستم تهویه ایستگاه انجام می‌شود و هندسه دوم مربوط به فضای مترو است که محل مربوط به مسافران و قسمت‌های عمومی را شامل می‌شود.

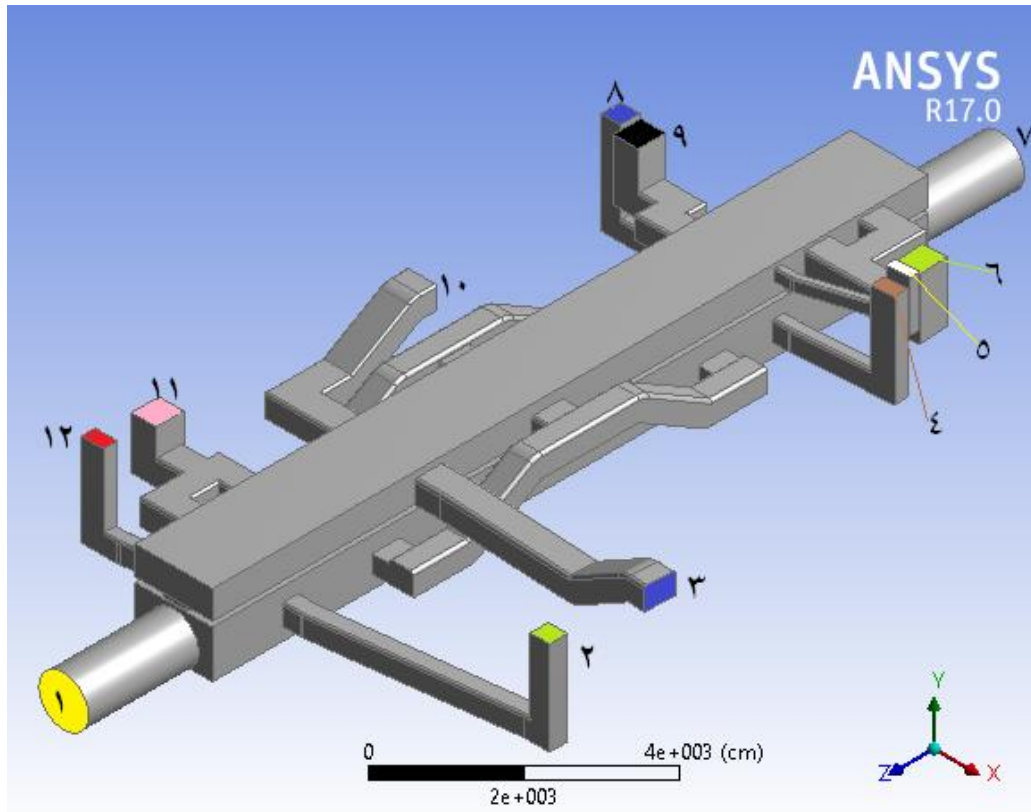
هندسه ایستگاه شامل، کلیات ایستگاه، راهروهای عبور مسافران، تراز کنترل بلیط، تراز سکو، ورودی و خروجی‌های هوا، دریچه‌های بین تراز کنترل بلیط و تراز سکو و نیز ورودی و خروجی‌های مربوط به

کارکنان و شرایط اضطراری است. در این مدل قطر دهانه تونل ۹ متر و طول ایستگاه ۱۳۰ متر است. مدل دوم مربوط به اتاق تأسیسات برقی و کنترلی مترو (اتاق سیگنالی‌نگ) است که در هر ایستگاه وجود دارد. سیستم تهویه این اتاق به صورت جدا انجام می‌شود و به همین دلیل مدل‌سازی و حل آن جدا از مدل اصلی انجام شده است.



شکل ۵-۲: نقشه سه‌بعدی مربوط به ایستگاه.

در شکل ۳-۵ هندسه نهایی مربوط به ایستگاه نشان داده شده است شرایط مرزی مربوط به این مدل در مرحله طراحی نام‌گذاری شده است. جدول ۵-۱ شرایط مرزی و توضیحات مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۴-۵ هندسه اتاق تأسیسات برقی نشان داده شده است این اتاق دارای طول ۲۱ متر و عرض ۱۲ متر است. این اتاق در دو طبقه به ارتفاع‌های ۵ و ۸ متر ساخته شده است و ۶ دریچه  $۱ \times ۱$  متر بین دو طبقه برای انتقال هوا وجود دارد. تهویه این اتاق با یک فن و به صورت جدا از ایستگاه انجام می‌شود.



شکل ۳-۵: مدل هندسه ایستگاه.



شکل ۴-۵: مدل هندسه اتاق برق و کنترل.

جدول ۵-۱: شرایط مرزی در هندسه ایستگاه.

شماره	نام شرط مرزی	توضیحات
۱	Inlet.W	ورودی غربی هوا و مسیر حرکت قطار
۲	Outlet1	تردد کارکنان و در حالت اضطراری راهرو خروج
۳	Outlet2	ورود و خروج مسافران (جنوبی)
۴	Outlet3	تردد کارکنان و در حالت اضطراری راهرو خروج
۵	Outlet.H1	ورود و خروجی هوا در مواقع اضطراری
۶	Outlet.H2	ورود و خروجی هوا در مواقع اضطراری
۷	Inlet.E	ورودی شرقی هوا و مسیر حرکت قطار
۸	Outlet4	تردد کارکنان و در حالت اضطراری راهرو خروج
۹	Inlet.H	ورودی هوای تازه برای تراز کنترل بلیط
۱۰	Outlet5	ورود و خروج مسافران (شمالی)
۱۱	Outlet.H3	ورود و خروجی هوا در مواقع اضطراری
۱۲	Outlet6	تردد کارکنان و در حالت اضطراری راهرو خروج
۱۳	Reyl.Wall	محل کف مسیر حرکت قطار در ایستگاه که هنگام ترمز و شتاب گیری حرارت تولید می کند
۱۴	Pele.Wall	محل های مربوط به پله برقی که هنگام کار حرارت تولید می کنند.

### ۵-۳- شبکه بندی

با توجه به این که مدل هندسی پیچیده است بنابراین از شبکه بندی Tetrahedral استفاده شده است.

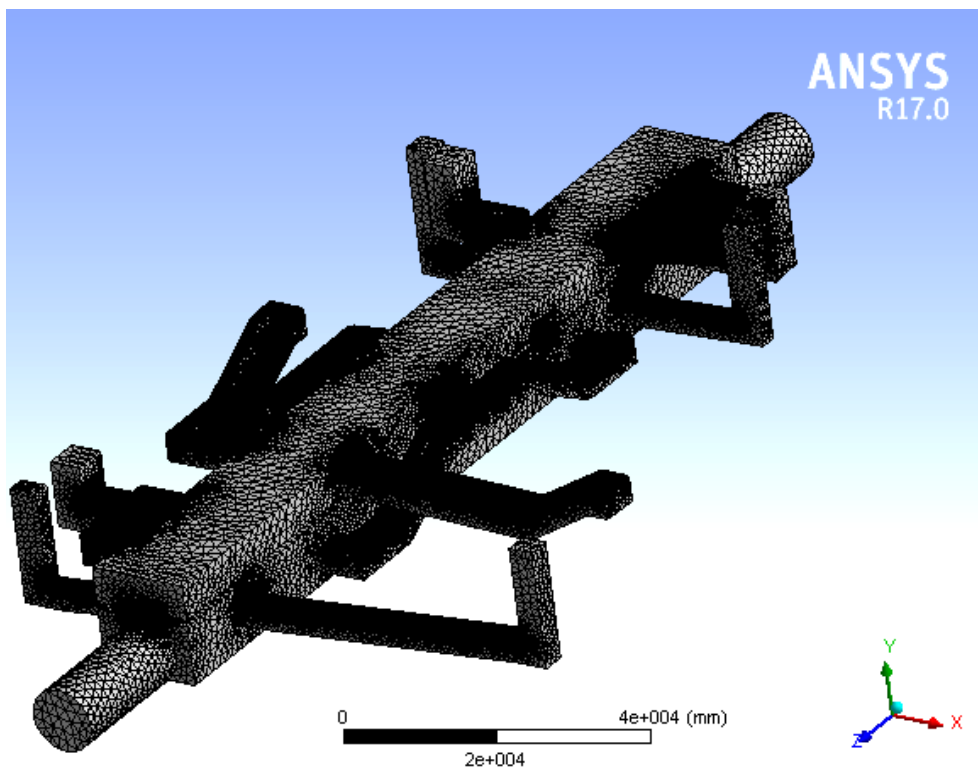
در این شبکه بندی الگوریتم Patch Conforming به صورت اتوماتیک استفاده شده است.

همان طور که گفته شد شکل دارای پیچیدگی است و سطوح کوچک و انحناهایی با شعاع کم در

برخی راهروها و دریچه ها وجود دارد. برای این که سطوح باریک و انحناها به خوبی شبکه بندی شوند ابتدا

از خاصیت Virtual Topology برای قسمت‌های با انحنا و صفحات کوچک استفاده شد و در ادامه تنظیمات انحنا (Curvature) و صفحات باریک (Proximity) در مدل شبکه‌بندی فعال شده است.

سایزبندی مدل با توجه به ابعاد کوچک‌ترین قسمت‌ها در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که شبکه نهایی از کیفیت خوبی برخوردار باشد. در شکل ۵-۵ شبکه‌بندی مدل اصلی نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که قسمت‌هایی که دارای انحنا و یا سطوح کوچک هستند از تعداد مش بیشتری در واحد حجم و سطح برخوردارند. در جدول ۲-۵ مشخصات شبکه‌بندی آورده شده است در این جدول تعداد المان‌ها و گره‌ها و کیفیت شبکه‌بندی مشخص شده است.



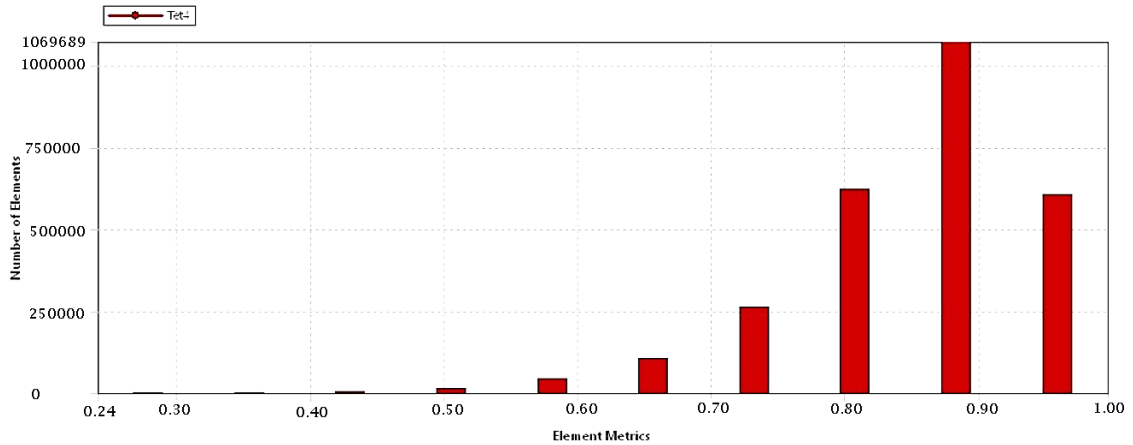
شکل ۵-۵: نحوه شبکه‌بندی شدن هندسه ایستگاه.

جدول ۲-۵: مشخصات شبکه‌بندی ایستگاه.

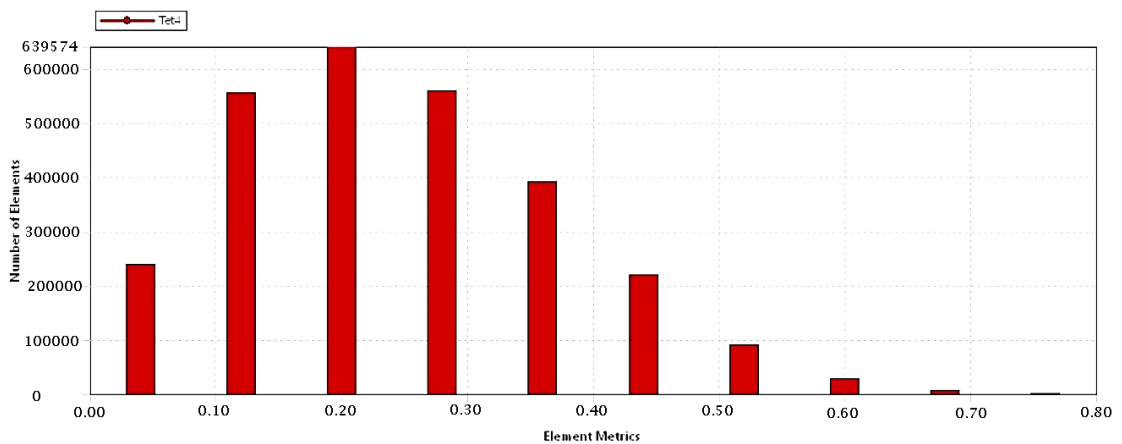
تعداد المان	تعداد گره	متوسط کیفیت کشیدگی	متوسط کیفیت تعامد
۲۷۱۶۸۷۲	۵۳۰۳۶۵	۰/۲۴۴۱۳	۰/۸۵۱۵



مشاهده می‌شود که شبکه‌بندی هندسه ایستگاه بر اساس معیار کشیدگی در وضعیت عالی و بر اساس کیفیت تعامد دارای کیفیت بسیار خوب است. نمودار توزیع کیفی هرکدام از معیارهای کیفیت مش در شکل زیر آمده است.

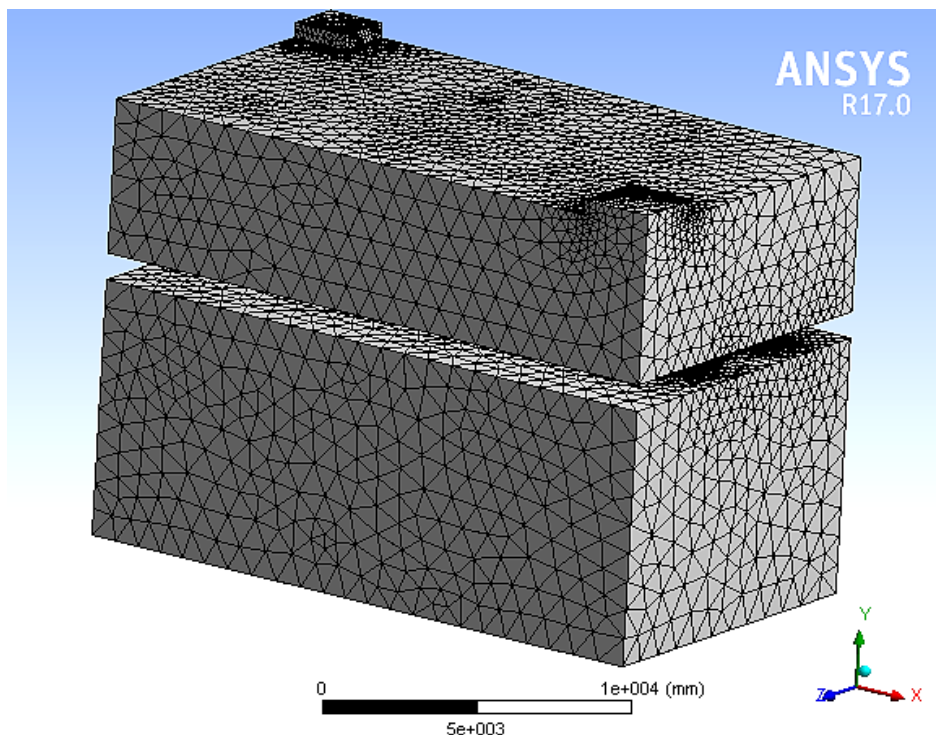


شکل ۵-۶: نمودار توزیع کیفی المان‌ها در شبکه‌بندی مدل اصلی بر اساس کیفیت تعامد.



شکل ۵-۷: نمودار توزیع کیفی المان‌ها در شبکه‌بندی مدل اصلی بر اساس معیار کشیدگی.

برای هندسه اتاق تأسیسات نیز از شبکه‌بندی Tetrahedral استفاده شده است. هندسه اتاق تأسیسات به علت وجود شش دریچه با ابعاد ۱\*۱ متر بین طبقات و همچنین وجود انحنا در این دریچه‌ها مانند مدل هندسه ایستگاه شبکه‌بندی شد. شکل ۵-۸ نحوه شبکه‌بندی اتاق تأسیسات را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۸: نحوه شبکه‌بندی اتاق تأسیسات.

در جدول ۵-۳ مشخصات شبکه‌بندی اتاق تأسیسات نشان داده شده است با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که شبکه‌بندی هندسه اتاق تأسیسات بر اساس معیار کشیدگی در وضعیت عالی و بر اساس کیفیت تعامد دارای کیفیت بسیار خوب است.

جدول ۵-۳: مشخصات شبکه‌بندی اتاق تأسیسات.

تعداد المان	تعداد گره	متوسط کیفیت کشیدگی	متوسط کیفیت تعامد
۳۳۴۴۳۹	۶۴۳۶۱	۰/۲۳۷۲۱	۰/۸۵۴۸۳

## ۵-۴- استقلال از شبکه

برای انتخاب بهترین ابعاد برای شبکه نهایی باید تاثیر تعداد المان‌ها بر روی جواب نهایی یا به عبارتی تاثیر ابعاد شبکه بر روی دبی حجمی فن اصلی بررسی شود. برای انجام این کار مینیمم سائز المان‌ها

در شبکه از ۱۰mm تا ۲۵۰mm تغییر داده شد. با کوچک شدن سایز المان تعداد المانها در شبکه بیشتر می‌شود. نتایج مربوط به بررسی بهترین سایز المان در جدول ۴-۵ آورده شده است.

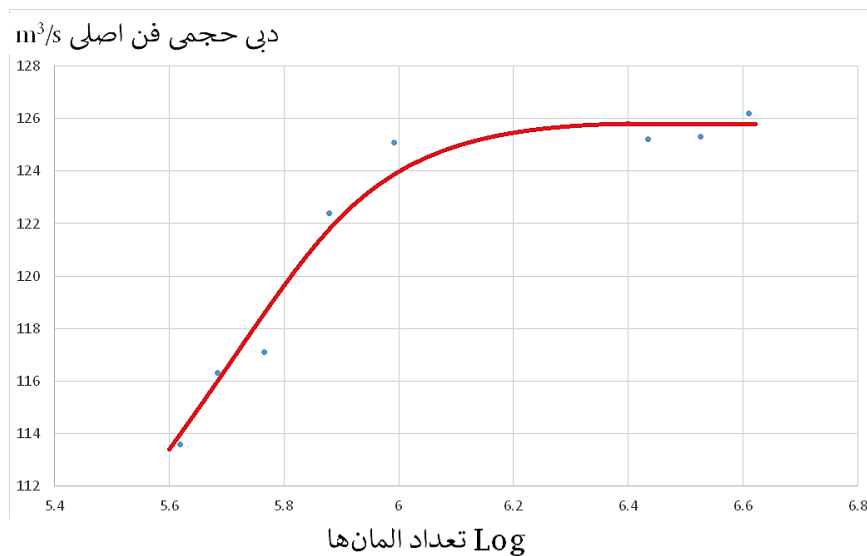
جدول ۴-۵: بررسی تعداد و سایز المان بر روی جواب نهایی

تعداد المان	Log تعداد المان	مینیمم سایز (mm)	دبی حجمی فن اصلی m <sup>3</sup> /s
۴۱۶۰۵۴	۵/۶	۲۵۰	۱۱۳/۶
۴۸۳۴۰۳	۵/۷	۲۰۰	۱۱۶/۳
۵۸۳۷۳۸	۵/۸	۱۵۰	۱۱۷/۱
۷۵۶۹۲۱	۵/۹	۱۰۰	۱۲۲/۴
۹۸۱۰۹۲	۶	۷۵	۱۲۵/۱
۲۷۱۹۶۳۰	۶/۴	۵۰	۱۲۵/۲
۳۳۵۲۴۸۷	۶/۵	۲۵	۱۲۵/۳
۴۰۷۶۵۳۹	۶/۶	۱۰	۱۲۶/۲

برای انتخاب بهترین سایز المان و در نهایت تعیین تعداد المان در شبکه به گونه‌ای که با افزایش

المان تاثیری در جواب نهایی رخ ندهد نمودار مربوط به لگاریتم تعداد المان در مقابل دبی حجمی فن

اصلی رسم شد. این نمودار در شکل ۹-۵ نشان داده شده است.



شکل ۹-۵: نمودار انتخاب بهترین سایز المان در شبکه بندی اصلی.

با توجه به شکل ۵-۹ مشاهده می‌شود که از مینیمم سایز ۵۰mm به بعد تاثیر زیادی در جواب نهایی یعنی دبی حجمی فن اصلی ایجاد نمی‌شود. بنابراین بهترین سایز برای المان با توجه به شکل ۵-۹ و جدول ۴-۵ انتخاب مینیمم سایز المان ۵۰mm است که در این حالت تعداد المان‌های مدل حدود دو میلیون و هفتصد هزار المان است.

برای بررسی استقلال از شبکه مدل ساخته شده در سه حالت مختلف شبکه‌بندی شد و نتایج آن با نتایج مدل واقعی مقایسه شد. شبکه‌های ایجاد شده عبارت‌اند از:

(۱) ایجاد شبکه با سلول‌ها بزرگ‌تر

(۲) ایجاد شبکه با سلول‌های کوچک‌تر

(۳) ایجاد شبکه با سلول‌های متفاوت از شبکه اصلی (شبکه متورم)

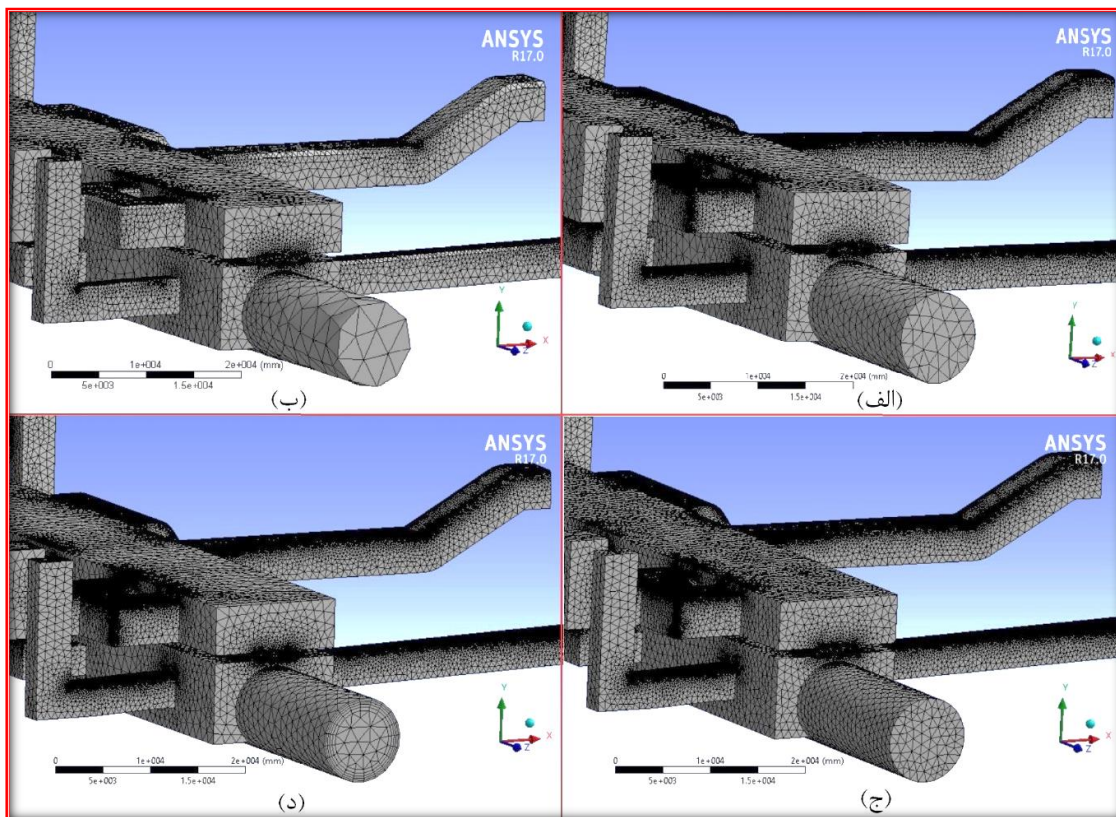
در جدول ۵-۵ مشخصات مربوط به شبکه‌بندی‌های مختلف برای بررسی استقلال از شبکه آورده شده است. در این جدول شبکه‌های ایجاد شده از نظر تعداد المان، تعداد گره، کیفیت شبکه و ابعاد شبکه بررسی شده است.

جدول ۵-۵: مقایسه شبکه‌بندی‌های مختلف در بررسی استقلال از شبکه.

کم‌ترین سایز	کیفیت کشیدگی	کیفیت تعامد	تعداد گره	تعداد المان	
۵۰ mm	۰/۲۴۴۰۶	۰/۸۵۱۵۴	۵۳۰۹۰۱	۲۷۱۹۶۳۰	شبکه اصلی
۱۵۰ mm	۰/۲۴۷۱۵	۰/۸۴۹۹۲	۱۱۸۷۶۹	۵۸۳۷۳۸	شبکه بزرگ‌تر
۱۰ mm	۰/۲۴۳۳۶	۰/۸۵۱۸۲	۷۸۶۶۳۶	۴۰۷۶۵۳۹	شبکه کوچک‌تر
۲۷ mm	۰/۲۸۴۵۱	۰/۸۴۲۳۴	۱۲۹۸۵۱۴	۳۹۷۸۱۶۸	شبکه متورم

شکل ۵-۱۰ نمونه شبکه‌های ایجاد شده را نشان می‌دهد. با توجه به این که کیفیت کشیدگی و کیفیت تعامد برای تمام شبکه‌های ایجاد شده تا حدودی در وضعیت خوب است ولی باید توجه داشت

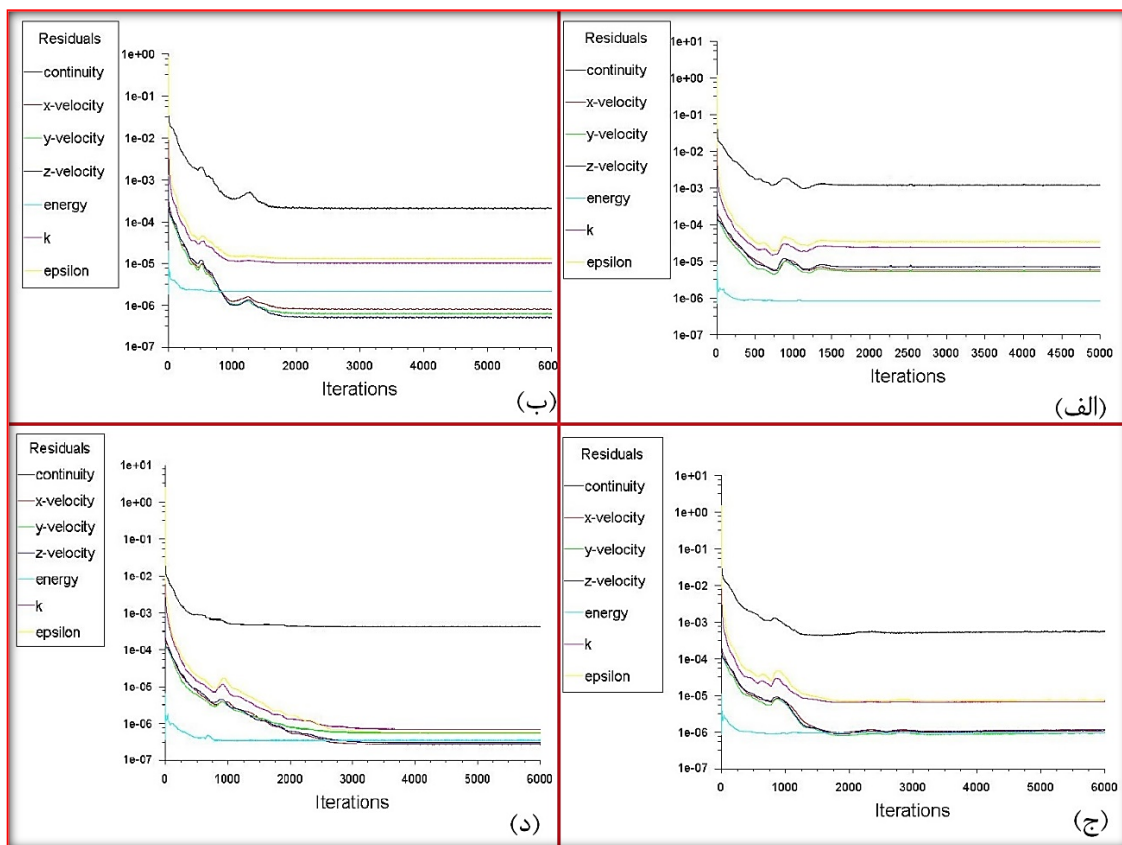
که استفاده از شبکه ریزتر اگرچه کیفیت بهتری دارد اما زمان حل مساله را بیشتر می‌کند و کامپیوتر قوی‌تری نیاز دارد.



شکل ۵-۱۰: شبکه‌های ایجاد شده برای بررسی استقلال از شبکه (الف) شبکه اصلی، (ب) شبکه درشت‌تر، (ج) شبکه ریزتر و (د) شبکه متورم.

شبکه با ابعاد بزرگتر باعث می‌شود تا قسمت‌هایی از مدل که دارای سطوح باریک و انحنا هستند به خوبی شبکه‌بندی نشوند و قسمتی از انحنا به علت نبود شبکه مناسب حذف شود. در شکل ۵-۲۳ (ب) به علت استفاده از شبکه بزرگ‌تر و عدم پوشش کامل انحنای دهانه ورودی ایستگاه که به شکل دایره است، مشاهده می‌شود که بعد از شبکه‌بندی دهانه ورودی ایستگاه از وضعیت دایره خارج شده و به یک چندضلعی تبدیل شده است. این کاهش سطح ممکن است در نتایج مقدراری ایجاد خطا کند. در رابطه با شبکه‌بندی متورم یا شبکه‌بندی لایه مرزی از چند نوع شبکه استفاده می‌شود (Tetrahedral, Prismatic, Piramidal) و چند نوعی بودن این شبکه باعث می‌شود تا کیفیت کمی پایین آمده و تعداد المان و گره نیز زیاد شود که در نهایت منجر به حل طولانی مساله می‌شود.

تمام شبکه‌های ایجاد شده یکبار با شرایط مرزی مشابه هم و مشابه مدل اصلی تا همگرایی کامل حل شدند و نمودارهای آن‌ها در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که برای تمام حالات بعد از نهایت ۳۰۰۰ تکرار مقادیر باقی‌مانده‌ها همگرا می‌شوند. در رابطه با شبکه لایه مرزی و شبکه کوچک‌تر همگرایی باقی‌مانده‌ها نسبت به شبکه اصلی و شبکه بزرگ‌تر بعد از تکرار بیشتری به همگرایی می‌رسد که این عامل به دلیل تعداد المان و تعداد گره بیشتر در این شبکه‌ها است.



شکل ۵-۱۱: نمودار همگرایی باقی‌مانده‌ها (الف) شبکه‌بندی اصلی، (ب) شبکه‌بندی بزرگ‌تر، (ج) شبکه‌بندی کوچک‌تر و (د) شبکه‌بندی متورم.

در جدول ۵-۶ مقایسه برخی نتایج حاصل از شبکه‌بندی‌های جدید با شبکه‌بندی اصلی آمده است. با توجه به جدول ۵-۶ و نتایج استقلال از شبکه متوجه می‌شویم که با تغییر شبکه تغییر بزرگ و بی‌معنی در مدل ایجاد نمی‌شود. اختلاف نتایج میان دبی حجمی در مدل‌های مختلف به علت این است که در مدل با شبکه بزرگ‌تر سطح مقطع کمتری از ورودی ایستگاه که دایره‌ای شکل است شبکه‌بندی می‌شود.

وجود سطح کوچکتر در مدل باعث می‌شود تا محاسبات دچار اشتباه شود و با توجه با این که دبی حجمی از حاصلضرب سرعت متوسط (m/s) در سطح عمود بر جریان ( $m^2$ ) به دست می‌آید با کوچکتر شدن سطح عمود بر جریان مقدار دبی حجمی کاهش می‌یابد، با توجه به این موضوع اختلاف دبی حجمی مربوط به شبکه‌بندی‌های مختلف منطقی است.

جدول ۵-۶: بررسی نتایج مربوط به استقلال از شبکه.

مشخصه مدل	دبی حجمی فن اصلی	دبی حجمی فن ایستگاه	سرعت هوا در گذرگاه گذرگاه عابر پیاده ۲	سرعت هوا در گذرگاه عابر پیاده ۵
مدل اصلی	۱۲۵/۲ $m^3/s$	۲۲/۵ $m^3/s$	۳/۴ m/s	۲/۸ m/s
مدل با شبکه بزرگ‌تر	۱۱۷/۱ $m^3/s$	۲۲/۵ $m^3/s$	۳/۳ m/s	۲/۸ m/s
مدل با شبکه کوچک‌تر	۱۲۶/۲ $m^3/s$	۲۲/۵ $m^3/s$	۳/۴ m/s	۲/۸ m/s
مدل با شبکه متورم	۱۲۵/۲ $m^3/s$	۲۲/۵ $m^3/s$	۳/۲ m/s	۲/۸ m/s

## ۵-۵- فیزیک مسئله

برای داشتن یک حل دقیق و مناسب باید ابتدا داده‌های اولیه که باید وارد نرم‌افزار شوند شناسایی و محاسبه شوند. این داده‌ها به صورت جداولی از شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد دریافت شد. داده‌ها لازم برای ورود به نرم‌افزار در جداول ۵-۷ تا ۵-۱۰ آورده شده است.

جدول ۵-۷: مشخصات شرایط آب و هوایی برای طراحی سیستم تهویه

دما °C	مشخصه
۳۸/۲	ماکسیمم دمای هوای خشک تابستان
-۱۳/۳	مینیمم دمای هوای خشک زمستان
۳۲	متوسط دمای هوای تابستان
۰	متوسط دمای هوای زمستان

جدول ۵-۸: ویژگی‌های اصطکاک سطوح

میزان زبری	سطح مورد نظر
۳۰ mm	زبری سطح بتن
۱۲۰ mm	زبری خدمات تونل (کابل، لوله‌ها و ...)
۱۴۰ mm	زبری کف مسیر
۵۰ mm	زبری سطح پله برقی‌ها
۴۰ mm	زبری دیگر سطوح

جدول ۵-۹: میزان هوای لازم و سرعت هوای مجاز در قسمت‌های مختلف [۶۵].

۴۰ m <sup>3</sup> /h	هوای لازم برای سکو و تراز کنترل بلیط
۴۰ m <sup>3</sup> /h	هوای لازم برای نواحی مربوط به کارکنان
۱۰٪ هوای تازه	هوای لازم برای مخبرات / اتاق سیگنالی‌نگ
۲۰٪ هوای تازه	مناطق تجاری و تفریحی
۶ m/s	حداکثر سرعت هوا در مناطق عمومی در حالت عادی
۷/۱ m/s	حداکثر سرعت هوا در دوپل امداد رسانی و ناحیه بین شفت تهویه و فن ایستگاه به همراه اثر پیستونی در حالت عادی
۲/۹ m/s	سرعت مجاز هوای ورودی در حالت عادی
۳/۵ m/s	سرعت مجاز خروج هوا (مناطق عابر پیاده) در حالت عادی
۵ m/s	سرعت مجاز خروج هوا (به جز مناطق عابر پیاده) در حالت عادی
۶ m/s	سرعت مجاز خروج هوا (در سطح بالا) در حالت عادی

جدول ۵-۱۰: منابع پایا و نا پایا حرارتی.

منبع تولید حرارت	بار حرارتی	حرارت در واحد سطح
بار حرارتی پله برقی‌ها	۹۰ KW	۲۶۰۰ W/m <sup>2</sup>
بار حرارتی ناشی از ترمز گیری و شتاب گیری	۶۰۰ KW	۱۰۲۵ W/m <sup>2</sup>

مسیر حرکت قطار شهری مشهد به صورت دو طرفه است به نحوی که با استفاده از یک تونل مسیر رفت و برگشت قطار در دو جهت انجام می‌شود. با توجه به محاسبات انجام شده و این که سطح مقطع موثر قطار در مقابل سطح مقطع تونل کم است و همچنین حرکت قطار در جهت‌های مخالف هم انجام



می‌شود حرکت پیستونی قطار بر روی سیستم تهویه تاثیر زیادی ندارد و نمی‌توان از این نیروی پیستونی به عنوان بخشی از هوای مورد نیاز سیستم تهویه استفاده کرد بنابراین محاسبات و طراحی سیستم تهویه بدون در نظر گرفتن نیروی پیستونی انجام شد.

معادله انرژی با توجه به این‌که انتقال انرژی گرمایی در مدل داریم فعال شد و برای حل اغتشاش از مدل استاندارد  $k - \varepsilon$  استفاده شد. یکی از نقاط قوت مدل استاندارد  $k - \varepsilon$  این است که در مدل کردن جریان هوای آزاد در داخل فضاهای ساختمانی و تهویه محیط ساختمان نتایج خوبی را ارائه می‌دهد. مدل استاندارد  $k - \varepsilon$  از پرکاربردترین مدل‌های اغتشاش در زمینه تهویه است؛ از طرفی در مطالعات مشابه که تاکنون انجام شده است این مدل اغتشاش از دیگر مدل‌ها بیشتر به چشم می‌خورد بنابراین مدل استاندارد  $k - \varepsilon$  برای حل اغتشاش استفاده شد.

در شهر مشهد با توجه به متوسط دمای هوای سالانه دانسیته هوا  $1/22 \text{ Kg/m}^3$  در نظر گرفته شد. برای مرزهای ورودی شرط مرزی سرعت را با توجه به این‌که قادر به اندازه‌گیری سرعت بودیم استفاده شد و برای مرزهای خروجی با توجه به این‌که اطلاعاتی از سرعت هوا نداشتیم و تنها اطلاعات مربوط به فشار هوا در اختیار بود ( $\text{Gauge Pressure} = 0$ ) شرط مرزی فشار انتخاب شده است. در رابطه با گرمای ناشی از ترمزگیری و شتاب‌گیری کف مسیر حرکت قطار در سکو به‌عنوان مرز دیوار انتخاب شد. برای حرارت ناشی از پله‌برقی نیز دیواره کف پله‌برقی‌ها به‌عنوان شرط مرزی انتخاب شد. در جدول ۵-۱۱ شرایط مرزی و مقادیر اولیه مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌ها آورده شده است و در جدول ۵-۱۲ شرایط مرزی و مقادیر اولیه دیواره‌ها آورده شده است.

جدول ۵-۱۱: شرایط مرزی ورودی‌ها و خروجی‌های مدل ایستگاه.

منطقه مورد نظر	عنوان	نوع شرط مرزی	سرعت (m/s)	قطر دینامیکی (m)	آشفتگی (%)
دهانه‌های تونل	Inlet.W , Inlet.E	Velocity Inlet	۲	۹	۵
خروجی‌های اضطراری	Outlet1 , Outlet3 , Outlet4 , Outlet6	Pressure Outlet	-	۳/۵-۳/۱	۵
گذرگاه‌های عابر پیاده	Outlet2 , Outlet5	Pressure Outlet	-	۴/۷	۵
ورودی هوای تراز کنترل بلیط	Inlet.H	Velocity Inlet	۱	۴/۶	۵

جدول ۵-۱۲: شرایط مرزی دیوارها در مدل ایستگاه.

منطقه مورد نظر	عنوان	نوع شرط مرزی	ارتفاع زبری (mm)	شرط حرارتی	بار حرارتی (w/m <sup>2</sup> )
کف مسیر حرکت قطار	Reyl.Wall	Wall	۱۴۰	Heat Flux	۱۰۲۵
پله برقی‌ها	Pele.Wall	Wall	۵۰	Heat Flux	۲۶۰۰
دیوارهای ایستگاه	Wall-Solid	Wall	۴۰	Heat Flux	۰

در مدل اتاق تاسیسات یک ورودی هوا با شرط مرزی Velocity Inlet طراحی شد که مقدار سرعت هوا در این ورودی  $1/5 \text{ m/s}$  تعیین شد. شرط حرارتی Heat Flux برای دیواره کف اتاق در نظر گرفته شد که مقدار بار حرارتی  $150 \text{ w/m}^2$  برای طبقه پایین به علت وجود دستگاه‌های با بار حرارتی کمتر و بار حرارتی  $200 \text{ w/m}^2$  برای طبقه همکف به علت بار حرارتی بیشتر در نظر گرفته شد.

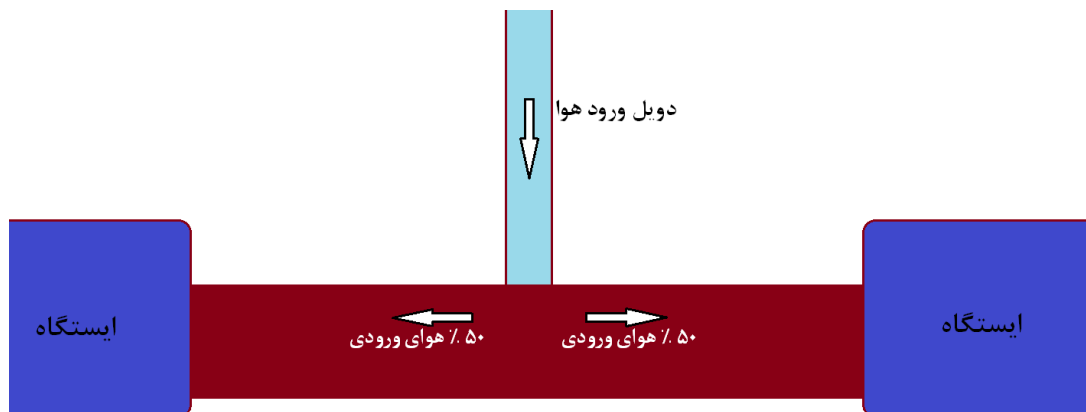
## ۵-۶- حل مسئله

با توجه به این که مسیرهای ورود هوا و خروج هوا به جو می‌رسند و ورودی‌ها و خروجی‌های هوا در تراز ارتفاع مساوی از سطح دریا قرار دارند بنابراین می‌توانیم هوا را برای مدل نسبتاً تراکم پذیر در نظر بگیریم به همین دلیل برای حل مساله تهویه از حلگر مبتنی بر فشار استفاده شد. حل این مسئله به صورت حجم محدود و مستقل از زمان در نظر گرفته شده است. برای حل مدل تهویه مترو از روش

Secend-Order Upwind برای درون‌یابی پارامتر جابجایی، از روش Least-Squares Cell-Based برای گرادین‌ها، روش Secend-Order برای درون‌یابی فشار و درنهایت از روش SIMPLE برای کولپینگ فشار سرعت استفاده شده است. تعداد تکرارهای حل مسئله تا همگرایی کامل انجام شده است.

## ۵-۷- گزارش‌ها و پردازش‌ها

بعد از ساخت، اصلاح، و شبکه‌بندی مدل به بررسی میزان هوای لازم جهت تهویه مترو پرداخته شد. خط دو مترو مشهد بین هر ایستگاه یک دوپل تهویه دارد که این مجرا هوای موردنیاز تونل و ایستگاه‌های مجاور خود را تأمین می‌کند. حداکثر شیب در این مسیر ۳/۹ درصد است. با توجه به هندسه و معماری یکسان ایستگاه‌ها، مقاومت ایستگاه‌ها و تونل در مقابل جریان هوای ورودی از دوپل برای هر دو جهت هوا رسانی یکسان است. در شکل ۵-۱۲ نحوه کار دوپل هوا رسانی نشان داده شده است.



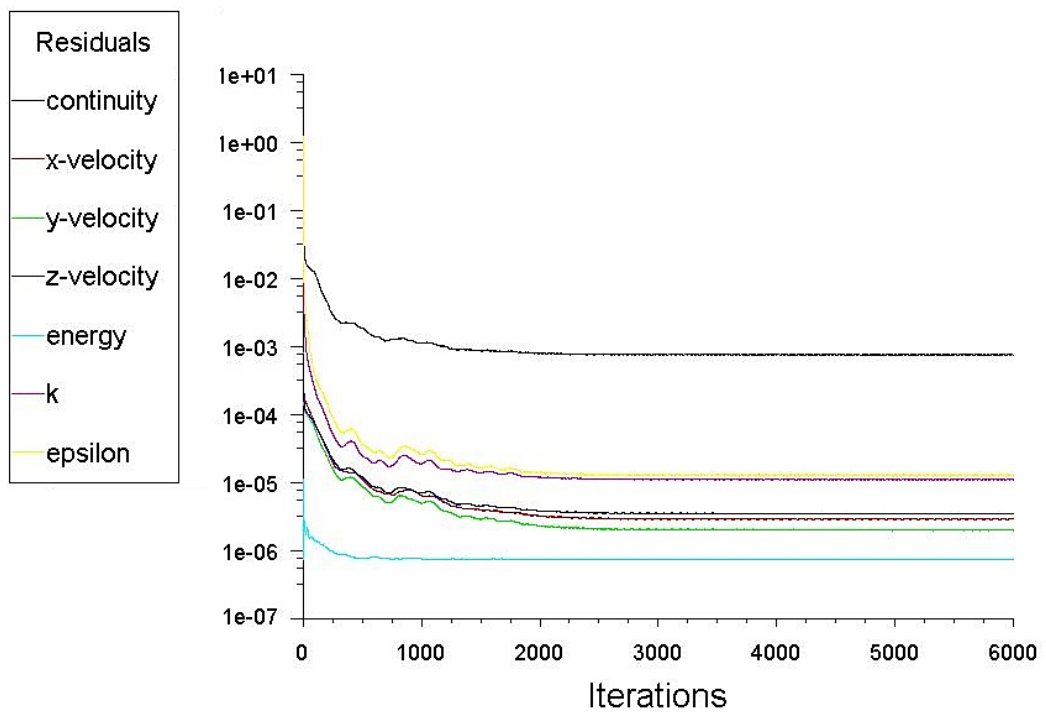
شکل ۵-۱۲: شماتیک دوپل هوا رسانی.

## ۵-۷-۱- تعیین مشخصات فن‌های تهویه

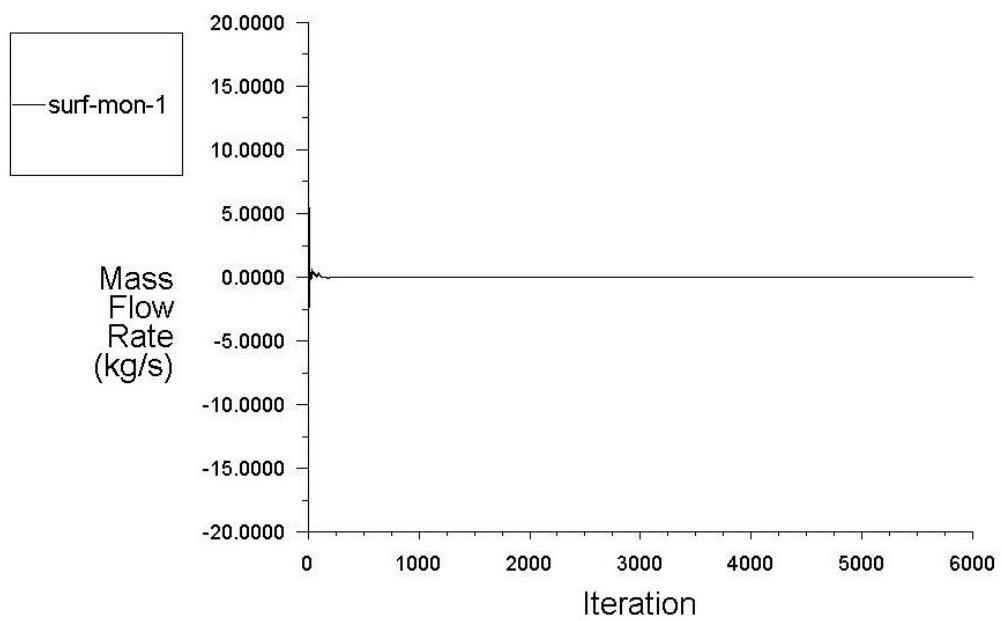
برای بررسی این موضوع که فن با چه دبی هوایی لازم است، ابتدا باید یک مرحله مدل CFD ساخته شده تا رسیدن به همگرایی حل شود. شرایط مرزی ورودی هوا، ماکسیمم سرعت‌های مجاز هوا برای حل اولیه در نظر گرفته شد. اگر بخواهیم مرحله به مرحله شرایط مرزی مختلف را بر روی مدل اعمال کنیم و از روی نتایج آن به بررسی مناسب یا عدم مناسب بودن سیستم تهویه اجرایی با مدل CFD بپردازیم

نیاز به زمان زیادی داریم تا شرایط مختلف را هرکدام یک بار با نرم‌افزار اجرا کنیم. برای حل این مشکل و کاهش زمان بررسی حالات مختلف شرایط مرزی از مطالعه پارامتری استفاده شد. برای مطالعه پارامتری مدل CFD، در شرایط مرزی ورودی برخی از پارامترها مانند سرعت، دما، فشار و ... را از حالت ثابت خارج کرده و به عنوان پارامتر ورودی مورد مطالعه تعیین می‌کنیم بعد آن مقادیر خروجی را که نیاز به بررسی آنها داریم را به عنوان نتایج حاصل از مطالعه پارامتری مشخص می‌کنیم. نحوه مطالعه پارامتری به این صورت است که نرم‌افزار با توجه به حل اولیه پارامترهای ورودی را که توسط کاربر تعیین می‌شوند را در مدل قرار داده و مقادیر مورد بررسی (مقادیر خروجی انتخاب شده) را از روی آنها محاسبه می‌کند. در واقع مطالعه پارامتری به ما این امکان را می‌دهد که با یک‌بار حل مسئله و همگرا شدن آن برای یافتن جواب مسئله در شرایط مرزی مختلف نیاز به حل مدل‌های مختلف نباشد.

نمودار مربوط به همگرایی و موازنه جرم ورودی و خروجی‌های هوا در شکل ۵-۱۳ و شکل ۵-۱۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به نمودار همگرایی بعد از ۳۰۰۰ تکرار مدل CFD تهویه ایستگاه به همگرایی می‌رسد. باقیمانده انرژی تا  $10^{-6}$  کاهش یافته است و باقیمانده اجزا تا  $10^{-5}$  کاهش داشته است و به تعادل رسیده‌اند.



شکل ۵-۱۳: نمودار همگرایی باقی مانده‌ها برای حل اولیه



شکل ۵-۱۴: نمودار موازنه جرم ورودی و خروجی هوا در مدل

برای پی بردن به بهینه‌ترین حالت مربوط به ورود هوا به ایستگاه از حل مرحله‌به‌مرحله پرهیز شد و با استفاده از قابلیت پارامتری کردن مسئله که زمان کمتری می‌گیرد بهترین دبی حجمی ورودی به

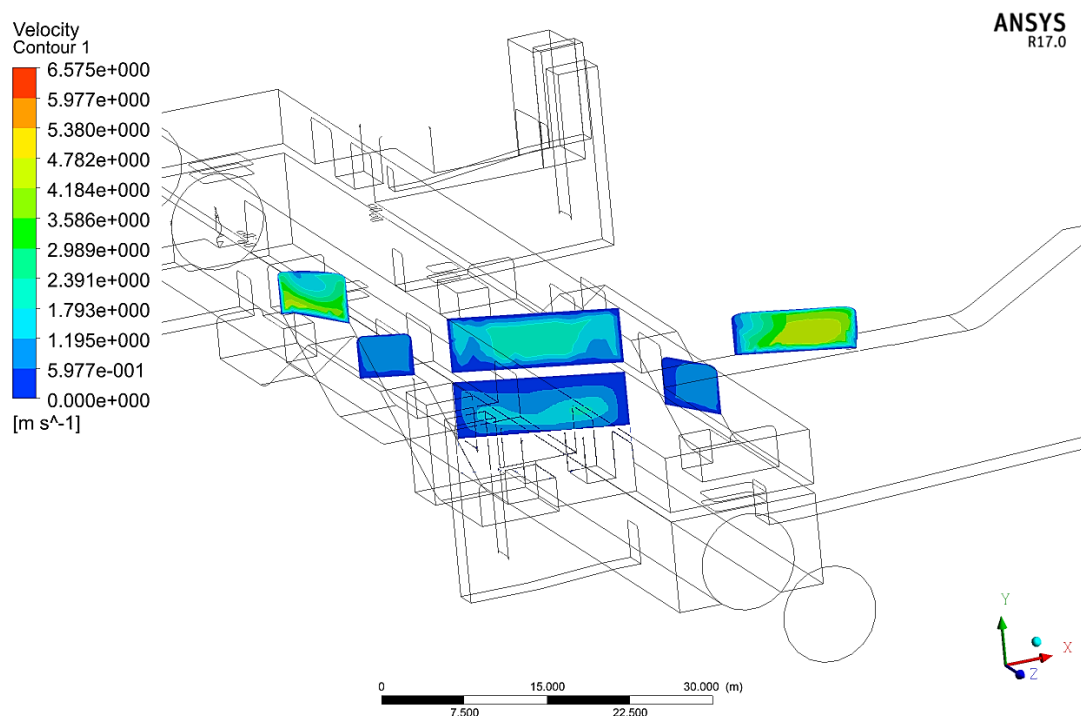
ایستگاه و در نتیجه فن مورد نیاز مشخص شد. نتایج مربوط به پارامتری کردن مدل در جدول ۵-۱۳ آورده شده است.

جدول ۵-۱۳: نتایج سرعت و دبی هوای ورودی و خرجی ها در بررسی پارامتری.

شماره بررسی	سرعت هوا در ورودی ایستگاه	سرعت هوای فن ایستگاه	دبی حجمی فن های اصلی	دبی حجمی فن ایستگاه	سرعت هوا در Outlet1	سرعت هوا در Outlet2	سرعت هوا در Outlet3	سرعت هوا در Outlet4	سرعت هوا در Outlet5	سرعت هوا در Outlet6	متوسط سرعت هوا در قسمت های عمومی
	m/s	m/s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
۱	۲/۹	۵	۱۸۱/۵	۱۱۲/۵	۵/۳	۶	۴/۷	۵/۵	۵	۵/۱	۹/۹
۲	۲/۹	۴	۱۸۱/۵	۹۰	۵	۵/۷	۴/۵	۵/۳	۴/۷	۴/۸	۹/۴
۳	۲/۷	۳	۱۶۹	۷۵/۵	۴/۵	۵/۱	۴	۴/۷	۴/۲	۴/۴	۸/۴
۴	۲/۵	۲	۱۵۶/۴	۴۵	۴	۴/۴	۳/۶	۴/۲	۳/۷	۳/۹	۷/۴
۵	۲/۳	۱	۱۴۳/۹	۲۲/۵	۳/۴	۳/۸	۳/۱	۳/۷	۳/۲	۳/۴	۶/۳
۶	۲/۲	۲	۱۳۷/۷	۴۵	۳/۶	۴	۳/۲	۳/۷	۳/۳	۳/۵	۶/۶
۷	۲/۱	۲	۱۳۱/۴	۴۵	۳/۴	۳/۸	۳/۱	۳/۶	۳/۲	۳/۳	۶/۳
۸	۲/۱	۱/۵	۱۳۱/۴	۳۳/۸	۳/۳	۳/۷	۳	۳/۵	۳/۱	۳/۲	۶/۱
۹	۲/۱	۱/۱	۱۳۱/۴	۲۴/۴	۳/۲	۳/۶	۲/۹	۳/۴	۳	۳/۲	۵/۹
۱۰	۲	۱	۱۲۵/۲	۲۲/۵	۳	۳/۴	۲/۷	۳/۲	۲/۸	۳	۵/۶
۱۱	۲	۰/۸	۱۲۵/۲	۱۸	۳	۳/۳	۲/۷	۳/۲	۲/۸	۲/۹	۵/۵
۱۲	۱/۸	۰/۸	۱۱۲/۶	۱۸	۲/۷	۳	۲/۴	۲/۹	۲/۵	۲/۷	۵
۱۳	۱/۵	۰/۶	۹۳/۹	۱۳/۵	۲/۳	۲/۵	۲	۲/۴	۲	۲/۲	۴

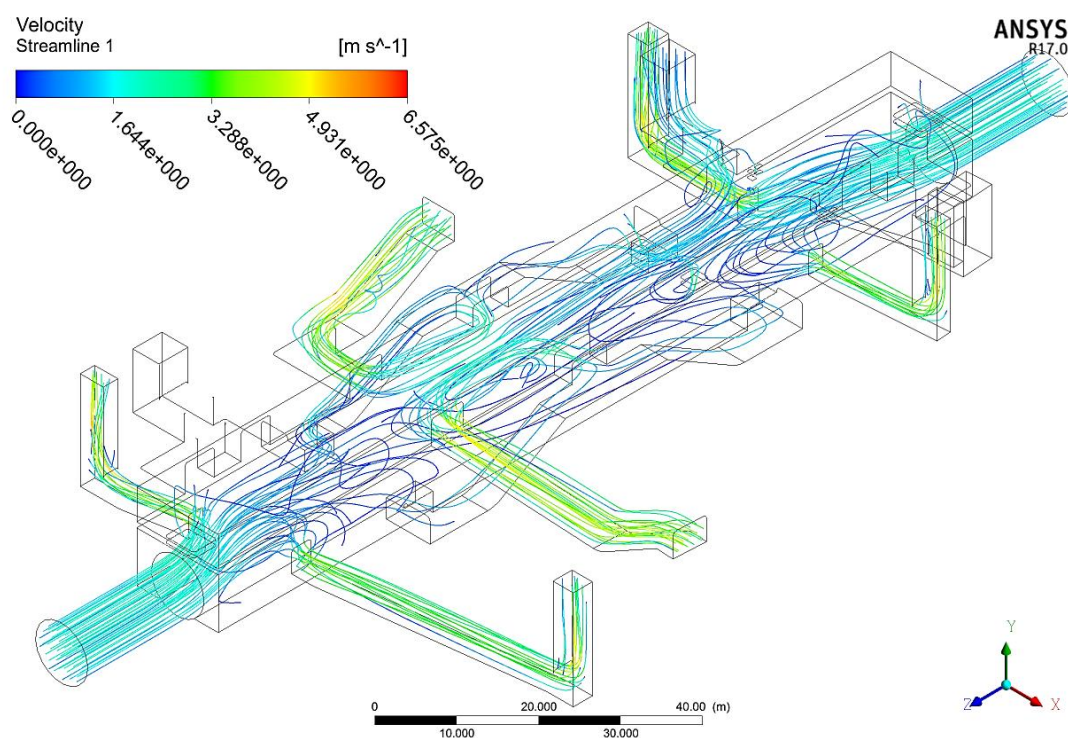
مطالعه پارامتری برای مدل اتاق تاسیسات نیز انجام شد و نتایج حاصل از آن نشان داد که برای تهویه این قسمت از ایستگاه نیاز به یک فن با دبی حداقل  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  است. این فن قادر است تا دمای هوای اتاق را با توجه به متوسط دمای سالانه  $19^\circ\text{C}$  در حدود  $24^\circ\text{C}$  نگه دارد و این دما برای تاسیسات موجود در اتاق مناسب است. برخی از تاسیسات موجود در این اتاق گرمای زیادی تولید می‌کنند که البته مجهز به تهویه داخلی می‌باشند؛ بنابراین برای تهویه این اتاق یک جریان هوای ملایم جهت کاهش گرمای اتاق کافی است این به شرطی است که به علت حساسیت دستگاه‌های موجود در اتاق برای تاسیسات همواره جریان هوا و دمای اتاق مناسب باشد.

متوسط سرعت هوا در قسمت‌های عمومی با استفاده از ایجاد یک پلان که در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است بررسی شد. این پلان مرکز سکو، مرکز تراز کنترل بلیط و گذرگاه عابر پیاده (قسمت‌های عمومی) را شامل می‌شود. در این شکل کنتور سرعت مربوط به حالت بهینه یعنی استفاده از فن اصلی با دبی حجمی  $125/2 \text{ m}^3/\text{s}$  و فن ایستگاه باید با دبی حجمی  $22/5 \text{ m}^3/\text{s}$  نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۵: پلان مربوط به مطالعه پارامتری قسمت‌های عمومی که بر اساس سرعت هوا رنگ‌بندی شده است.

با توجه به قوانین و استانداردهای مربوط به سرعت هوا در مترو به بررسی نتایج مختلف مطالعه پارامتری می‌پردازیم. نتایج حاصل از مدل‌سازی پارامتری نشان می‌دهد که بهترین سرعت برای تهویه مترو مربوط به بررسی پارامتری ۱۰ در جدول ۵-۱۳ است. و این بدان معناست که فن‌های اصلی که در ابتدا و انتهای هر ایستگاه در نظر گرفته می‌شوند باید قادر به تولید دبی حجمی  $125/2 \text{ m}^3/\text{s}$  و فن ایستگاه باید قادر به تولید دبی حجمی  $22/5 \text{ m}^3/\text{s}$  باشد. در شکل ۵-۱۶ خطوط جریان هوا مربوط به مدل CFD انتخاب شده نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶: خطوط جریان مربوط به فن اصلی با دبی حجمی  $125/2 \text{ m}^3/\text{s}$  و فن ایستگاه با دبی حجمی  $22/5 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
 شکل ۵-۱۶ نشان می‌دهد که هوا به خوبی در تمام قسمت‌های مختلف ایستگاه جریان دارد و ماکسیمم سرعت هوا را در خروجی‌ها و در محل تغییر زاویه خروجی‌ها داریم.

### ۵-۷-۲- طراحی سیستم تهویه با توجه به تغییرات دمایی شهر مشهد

طراحی سیستم تهویه باید بر اساس دمای طرح انجام شود. برای تعیین دمای طرح از متوسط دمای هوا در فصل‌های زمستان و تابستان استفاده شده است. علت استفاده از دمای متوسط این است که



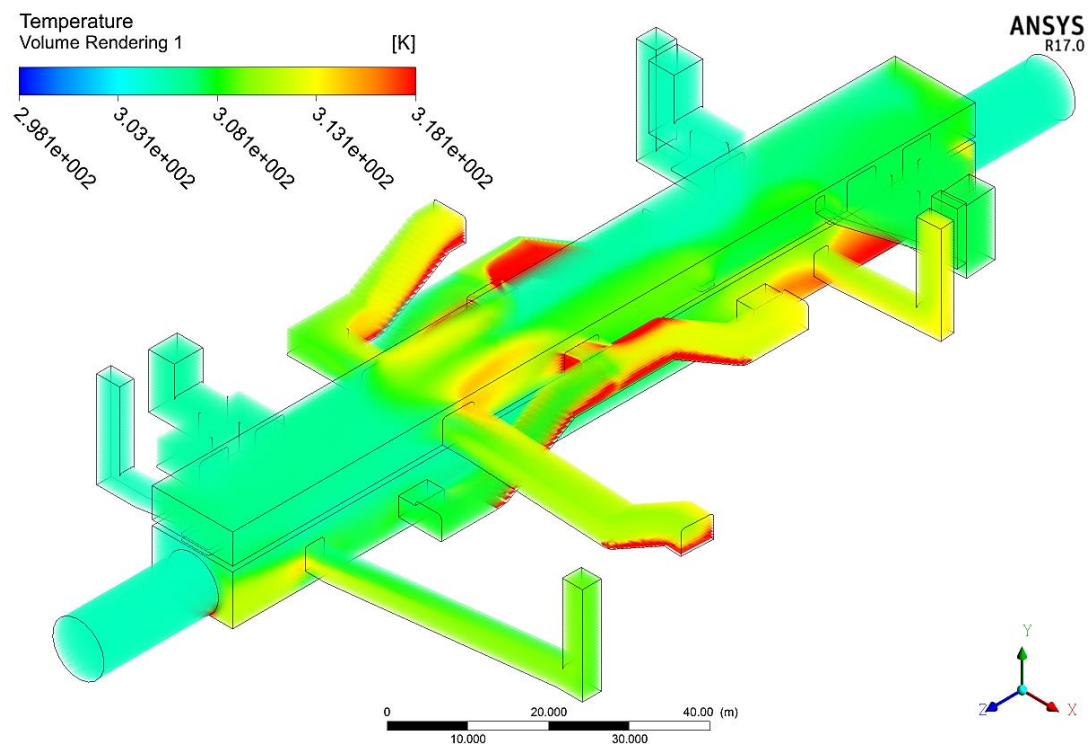
دمای واقعی هر فصل به این مقدار نزدیک تر است؛ از طرف دیگر مقادیر مربوط به ماکسیمم و مینیمم دمای هوای هر فصل ممکن است در طول سال یک یا چند بار بیشتر اتفاق نیفتند. طبق مطالعات انجام شده توسط شرکت قطار شهری مشهد و شرکت زیترن اسپانیا دمای پیشنهادی مناسب برای داخل مترو در فصل تابستان دمای  $23^{\circ}\text{C}$  تا  $27^{\circ}\text{C}$  و برای فصل زمستان  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $24^{\circ}\text{C}$  و رطوبت پیشنهادی  $50\%$  است. تراز کنترل بلیط، قسمت‌های مرکزی سکو و راهروهای عبور مسافران جزء پرتددترین قسمت‌های مترو می‌باشند، بنابراین این قسمت‌ها باید شرایط آسایش حرارتی لازم را داشته باشند از طرفی متوسط دمای هوا در قسمت‌های شلوغ و پرتدد مترو که محل کنترل بلیط و مرکز ایستگاه است باید دارای دمای استاندارد باشد. در مدل CFD ساخته شده برای فصل تابستان دمای  $32^{\circ}\text{C}$  و برای فصل زمستان دمای  $0^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به مدل‌سازی شرایط تابستان و زمستان در جدول ۵-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۴: نتایج مدل‌سازی CFD برای تابستان و زمستان.

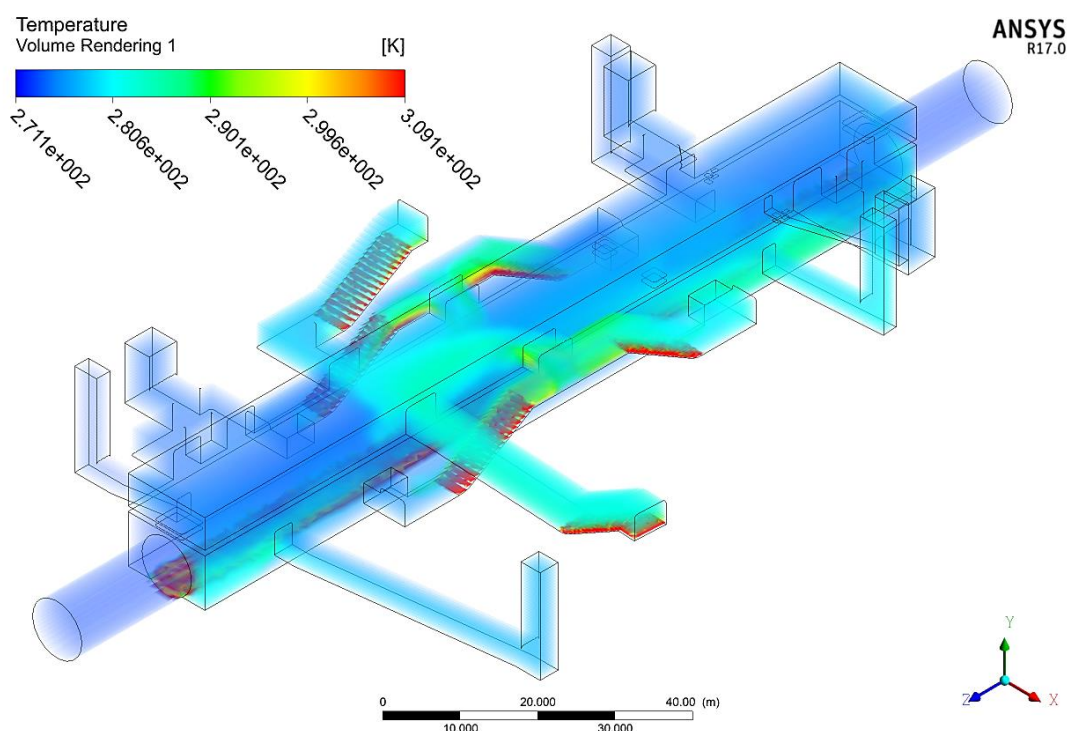
وضعیت آب و هوایی	تابستان	زمستان
دمای طرح	$32^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$
متوسط دمای معابر مسافری	$40^{\circ}\text{C}$	$7^{\circ}\text{C}$
متوسط دمای قسمت‌های مهم مترو	$37^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$

نتایج فوق نشان می‌دهد که استفاده از دستگاه ابروآش در فصل تابستان برای مترو مشهد الزامی است. در فصل زمستان با توجه به این که متوسط دمای قسمت‌های مهم مترو  $5^{\circ}\text{C}$  است نه تنها نیاز به دستگاه ابروآش نیست بلکه دمای دخل مترو سردتر از مقدار مجاز است. در شکل ۵-۱۷ وضعیت دمایی داخل مترو در فصل تابستان نشان داده شده است با توجه به شکل متوجه می‌شویم که گرم‌ترین نقاط مربوط به معابر عمومی و مرکز سکو می‌باشد که این مناطق پر تردد ترین مناطق نیز می‌باشند. در شکل ۵-۱۸ وضعیت دمایی داخل مترو در فصل زمستان در صورت عدم استفاده از دستگاه ابروآش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در فصل زمستان تنها کف مسیر حرکت قطار به علت گرمای ناشی از

ترمزگیری و شتاب‌گیری و محل پله برقی‌ها به علت حرارت ناشی از کار پله برقی دمایی تا حدود  $30^{\circ}\text{C}$  را دارند. این وضعیت در حالتی بررسی شد که فن ایستگاه خاموش باشد و تنها فن‌های اصلی در حال کار باشند. با توجه به شکل ۵-۱۸ بیشتر مناطق اداری و تجاری نیاز به وسایل گرمایشی دارند. دما در مناطق عمومی بین  $7^{\circ}\text{C}$  تا  $17^{\circ}\text{C}$  متغیر است.



شکل ۵-۱۷: وضعیت دمایی مترو در فصل تابستان.



شکل ۵-۱۸: وضعیت دمایی مترو در فصل زمستان.

دستگاه ابرواشر مترو مشهد قادر است تا رطوبت را به ماکسیمم مقدار ۹۰٪ برساند و دمای هوا را  $10^{\circ}\text{C}$  تا  $15^{\circ}\text{C}$  کاهش دهد. در صورتی که در فصل تابستان که متوسط دمای هوای قسمت‌های مهم مترو  $37^{\circ}\text{C}$  است از دستگاه ابرواشر استفاده شود دمای هوا به  $22^{\circ}\text{C}$  تا  $27^{\circ}\text{C}$  کاهش پیدا می‌کند. و این بدان معنا است که شرایط آسایش حرارتی برای مسافران فراهم می‌شود.

### ۵-۷-۳- انتخاب استراتژی‌های مناسب برای سیستم تهویه

برای انتخاب استراتژی مناسب، سیستم تهویه در حالت کار عادی مترو مورد بررسی قرار گرفت و سرعت هوا با توجه به کارکرد عادی فن‌ها در نظر گرفته شد. دمای مربوط به طراحی، متوسط دمای هوای فصل در نظر گرفته شد و دو حالت زمستان و تابستان بررسی شد. نتایج اولیه نشان می‌دهد که برای فصل تابستان نیاز جدی به استفاده از ابرواشر برای خنک کردن هوای داخل مترو است. در فصل زمستان نه تنها نیاز به استفاده از ابرواشر نیست بلکه دمای داخل ایستگاه کمتر از مقدار استاندارد است و حتی ممکن است در برخی قسمت‌ها نیاز به سیستم‌های گرمایشی باشد.

مدل CFD و حل آن نشان می‌دهد که در فصل تابستان دما بالاتر از حد استاندارد است و حتماً باید دستگاه ایرواشر در این فصل فعال باشد. در مورد فصل زمستان هوا سردتر از مقدار استاندارد است و نیاز به استفاده از ایرواشر در سیستم تهویه نیست. دمای طراحی به ما کمک می‌کند تا با استفاده از آن طراحی را انتخاب کنیم که در بیشتر مواقع سال از نظر آسایش حرارتی مناسب باشد ولی همواره باید توجه داشت که در برخی از مواقع سال دمای هوا ممکن است به گونه‌ای گرم‌تر و یا سردتر از حالت طراحی باشد که در نتیجه آسایش حرارتی را از بین ببرد. برای بررسی دماهای مختلف و کارکرد سیستم تهویه به مطالعه پارامتری در شرایط دمایی مختلف پرداخته شد. برای انتخاب حالات بهینه سیستم تهویه متناسب با دمای سطح شهر چهار استراتژی با استفاده از مطالعه پارامتری در محیط ANSYS Workbench بررسی شد. این مطالعه در طیف دمایی سردترین حالت شهر مشهد تا گرم‌ترین حالت انجام شد. این استراتژی‌ها عبارتند از:

- ۱) فعال بودن فن‌های اصلی و فن ایستگاه و استفاده از دستگاه ایرواشر.
- ۲) استفاده از فن‌های اصلی و فن ایستگاه بدون استفاده از دستگاه ایرواشر.
- ۳) استفاده از فن‌های اصلی، کنار گذاشتن فن ایستگاه و دستگاه ایرواشر.
- ۴) استفاده از فن‌های اصلی، کنار گذاشتن فن ایستگاه و نیاز به استفاده از وسایل گرمایشی در برخی قسمت‌ها.

### ۵-۷-۳-۱- استراتژی اول

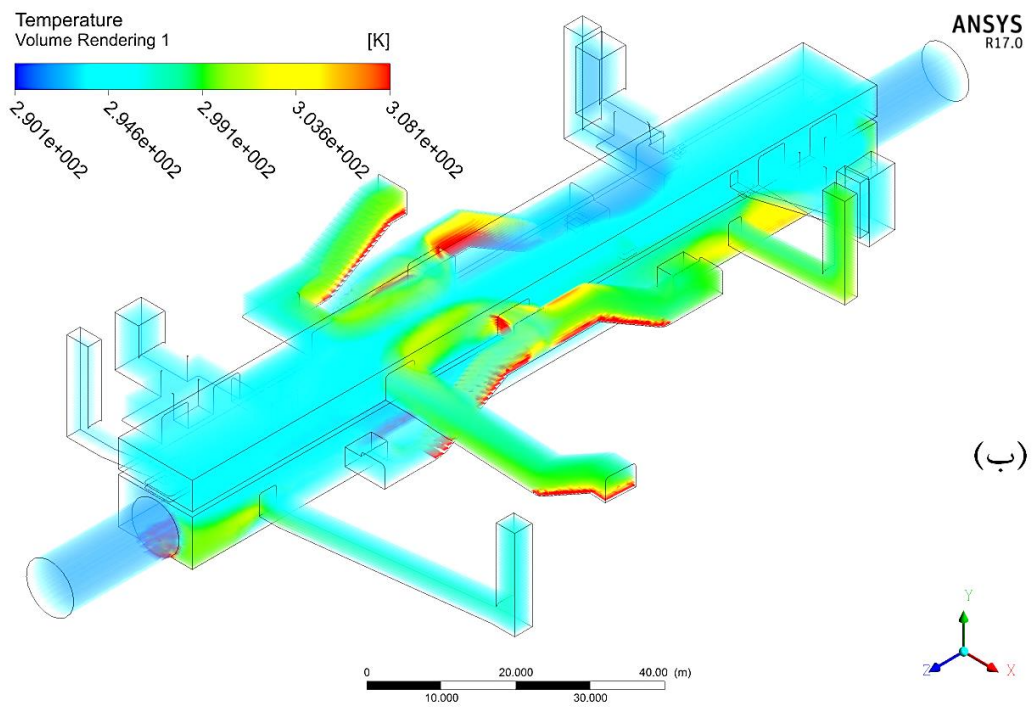
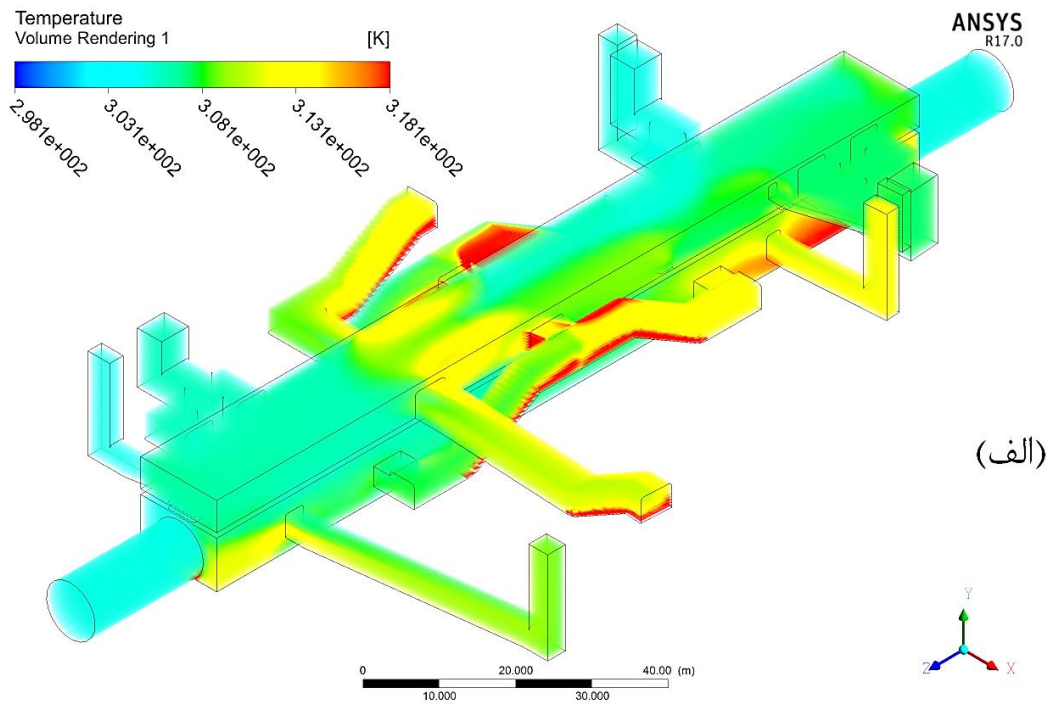
دمای پیشنهادی مناسب برای ایستگاه در فصل تابستان  $23^{\circ}\text{C}$  تا  $27^{\circ}\text{C}$  است. به عبارتی در صورتی که دمای ایستگاه از  $23^{\circ}\text{C}$  تا  $27^{\circ}\text{C}$  بیشتر شود باید دستگاه ایرواشر به همراه فن‌های اصلی و فن ایستگاه فعال شوند. برای بررسی این موضوع فن‌ها در حالت کار عادی مدل شد و یک مرحله تا همگرایی حل شد و بعد مطالعه پارامتری روی این مدل انجام شد. نتایج در جدول ۵-۱۵ نشان داده شده است.

در این استراتژی فن‌های اصلی، فن ایستگاه و دستگاه ابرواشر به کار گرفته می‌شوند و برای بررسی این موضوع از مطالعه پارامتری استفاده شد. مطالعه پارامتری در حالتی بررسی شد که فن‌های اصلی و فن ایستگاه با دبی حجمی استاندارد خود فعال باشند. در این حالت از دمای  $^{\circ}\text{C}$  -۶ در زمستان تا دمای  $^{\circ}\text{C}$  ۳۸ در تابستان مطالعه شد که این اختلاف دما، بیشترین محدوده اختلاف دمای سالانه شهر مشهد را در برمی‌گیرد. نتایج مربوط به مطالعه پارامتری نشان می‌دهد که در دماهای بالای  $^{\circ}\text{C}$  ۲۱ شهر مشهد استفاده از دستگاه ابرواشر برای مترو لازم است چراکه دمای ایستگاه‌ها از مقدار استاندارد پیشنهادی فراتر رفته و آسایش حرارتی برای مسافران برقرار نمی‌شود.

جدول ۵-۱۵: مطالعه پارامتری دمای سطح شهر و متوسط دمای قسمت‌های شلوغ مترو.

دمای ورودی $^{\circ}\text{C}$	متوسط دمای قسمت‌های عمومی $^{\circ}\text{C}$
-۶	-۰/۷
-۲	۴/۲
۰	۶/۱
۵	۱۱/۷
۱۰	۱۶/۷
۱۵	۲۲
۱۹	۲۶/۱
۲۰	۲۷
۲۱	۲۸
۲۴	۳۱/۱
۲۸	۳۵/۱
۳۲	۳۹
۳۵	۴۲
۳۸	۴۶/۳

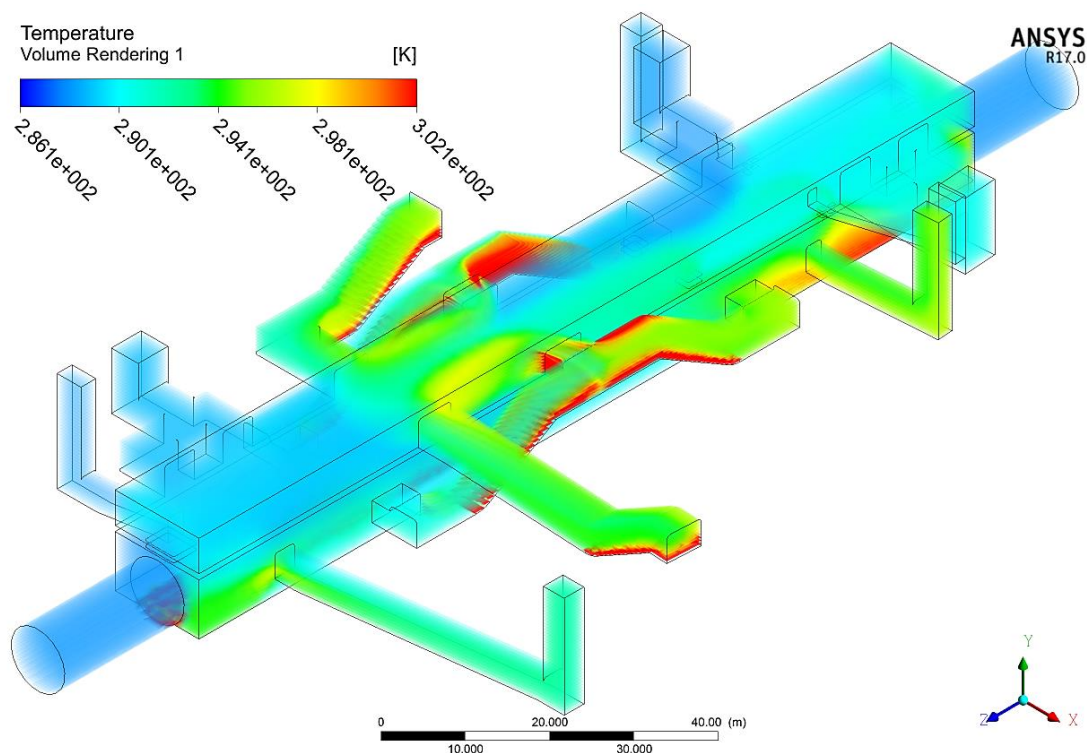
در شکل ۵-۱۹ تأثیر استفاده از استراتژی اول در دمای طراحی تابستان نشان داده شده است. تأثیر دستگاه ایرواشر در این حالت کاهش دمای هوا تا  $12^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شد.



شکل ۵-۱۹: دمای هوای داخل مترو در شرایط دمای طرح تابستان. (الف) عدم استفاده از ایرواشر. (ب) استفاده از ایرواشر.

## ۵-۷-۳-۲- استراتژی دوم

در این استراتژی دستگاه ایرواشر از سیستم تهویه کنار گذاشته می‌شود و تنها از فن‌ها استفاده می‌شود. با توجه به جدول ۵-۱۲ در دماهای  $15^{\circ}\text{C}$  تا  $20^{\circ}\text{C}$  متوسط دمای داخل مترو  $22^{\circ}\text{C}$  تا  $27^{\circ}\text{C}$  است. این نتیجه به این معناست که در این بازه دمایی در سطح مشهد سیستم تهویه مترو قادر است تا بدون استفاده از دستگاه ایرواشر شرایط آسایش حرارتی را برای مسافران فراهم کند. در شکل ۵-۲۰ و شکل ۵-۲۱ شرایط دمایی در بازه مربوط به استراتژی دوم آمده است.

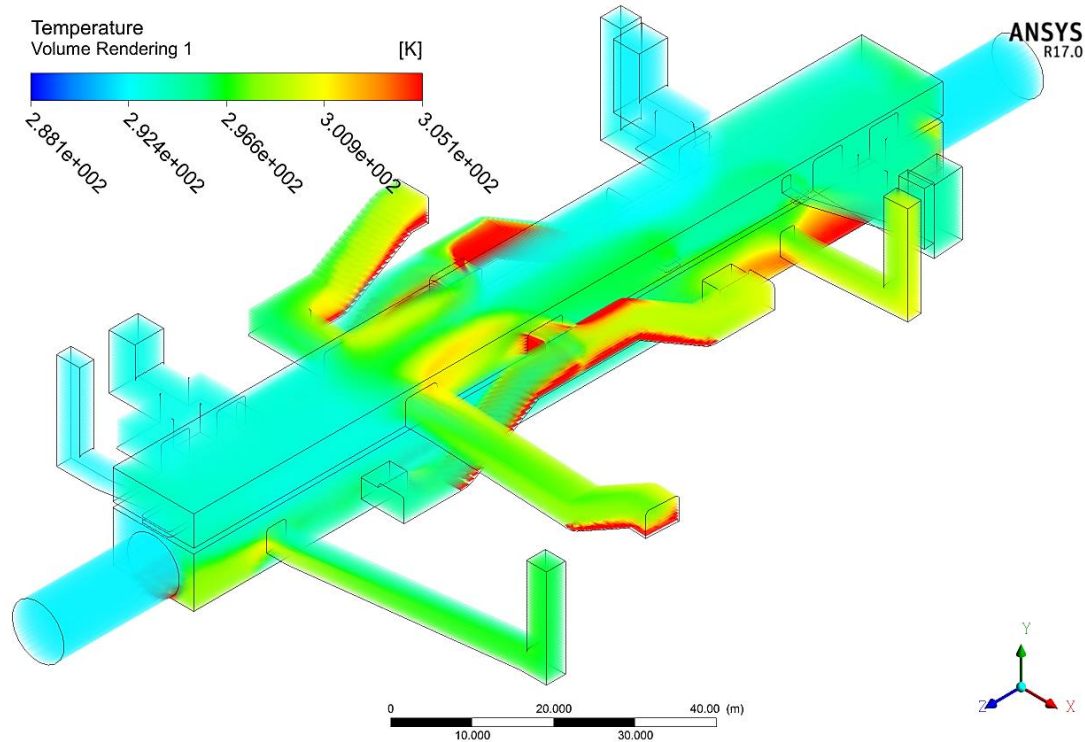


شکل ۵-۲۰: وضعیت آسایش حرارتی مترو در دمای  $15^{\circ}\text{C}$ .

در دمای  $15^{\circ}\text{C}$  همانطور که در شکل نشان داده شده است ماکسیم دمای مترو مربوط به کف مسیر حرکت قطار و پله‌برقی‌ها هستند. دمای محیط در گرمترین حالت خود در مناطق عمومی مقدار  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $26^{\circ}\text{C}$  را دارا می‌باشد که این وضعیت آسایش حرارتی را تامین می‌کند. در شکل ۵-۱۸ مشاهده می‌شود که در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  شهر مشهد دمای مناطق عمومی مترو  $24^{\circ}\text{C}$  تا  $28^{\circ}\text{C}$  است که باز هم در این حالت شرایط آسایش حرارتی برقرار بوده بنابراین استراتژی دوم برای دماهای  $15^{\circ}\text{C}$  تا



۲۰°C مناسب است و بدون استفاده از دستگاه ابروآشر و تنها با استفاده از فن‌های اصلی می‌توان شرایط آسایش حرارتی را برقرار کرد.

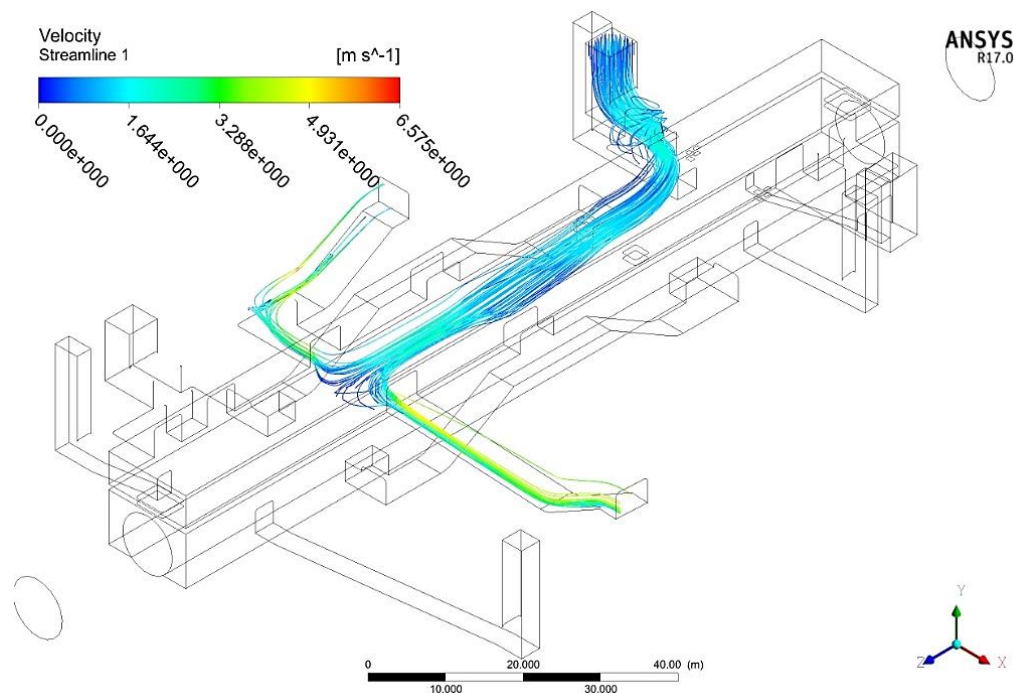


شکل ۵-۲۱: وضعیت آسایش حرارتی مترو در دمای ۲۰°C.

### ۵-۶-۳- استراتژی سوم

برای بررسی استراتژی سوم یعنی استفاده از فن‌های اصلی و عدم استفاده از دستگاه ابروآشر و فن ایستگاه ابتدا تاثیر فن ایستگاه بر روی آسایش حرارتی مطالعه شد. برای بررسی این حالت در شکل ۵-۲۲ تنها جریان هوایی که از فن ایستگاه ایجاد می‌شود به صورت خطوط جریان نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵-۲۲ مشاهده می‌شود فن ایستگاه برای خنک کردن تراز کنترل بلیط استفاده می‌شود و در مواقعی که هوا خنک است نیاز به این فن نیست. برای بررسی این موضوع که در چه دمایی نیاز به استفاده از فن ایستگاه نیست باید به صورت پارامتری این موضوع را بررسی کنیم.





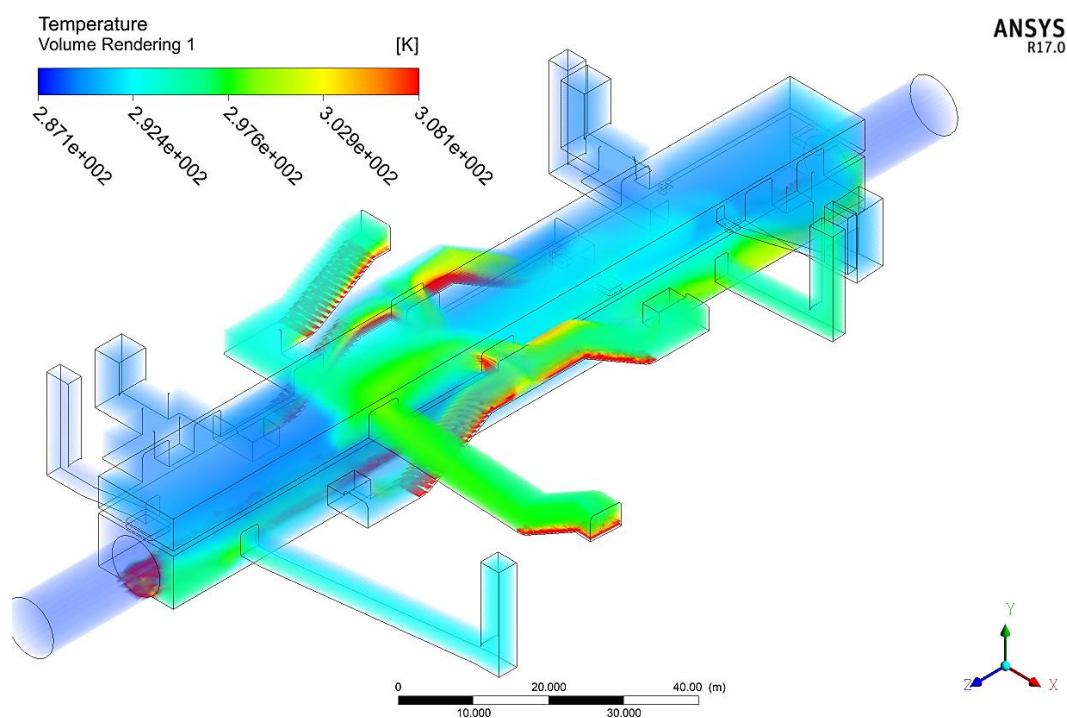
شکل ۵-۲۲: تاثیر فن ایستگاه بر روی تهویه مترو.

برای بررسی استراتژی سوم مدل را یکبار بدون در نظر گرفتن فن ایستگاه تا همگرایی کامل حل می‌کنیم و از حل این مدل به مطالعه پارامتری می‌پردازیم. نتایج مطالعه پارامتری بدون در نظر گرفتن فن ایستگاه در جدول ۵-۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۶: مطالعه پارامتری دمای سطح شهر و متوسط دمای قسمت‌های عمومی مترو.

دمای ورودی °C	متوسط دمای خروجی °C
-۳	۵/۶
۰	۸/۶
۵	۱۳/۶
۷	۱۵/۶
۱۰	۱۸/۶
۱۱	۱۹/۶
۱۷	۲۵/۶
۲۰	۲۸/۶

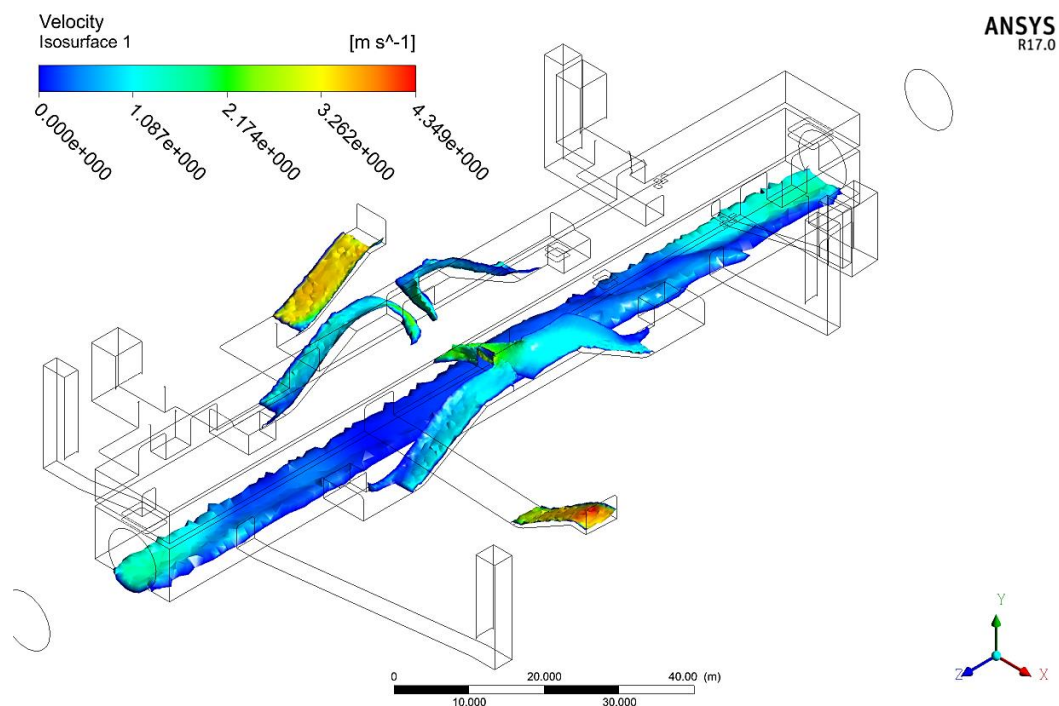
نتایج مطالعات نشان می‌دهد که چنانچه فن ایستگاه از سیستم تهویه مترو کنار گذاشته شود متوسط دمای قسمت‌های عمومی ایستگاه نسبت به دمای سطح شهر  $8/6^{\circ}\text{C}$  افزایش می‌یابد. استراتژی سوم باید در دماهای  $11^{\circ}\text{C}$  تا  $17^{\circ}\text{C}$  به کار گرفته شود تا شرایط آسایش حرارتی برای ایستگاه مترو برقرار شود. در شکل ۵-۲۳ وضعیت آسایش حرارتی در دمای  $15^{\circ}\text{C}$  در سطح شهر مشهد و عدم استفاده از دستگاه ایرواشر و فن ایستگاه نشان داده شده است. در شکل ۵-۲۳ و شکل ۵-۲۰ دو دمای یکسان از شهر مشهد نشان داده شده است در حالی که در شکل ۵-۲۳ از فن ایستگاه استفاده نشده است، در این استراتژی تراز کنترل بلیط و راهروهای عابر پیاده وضعیت حرارتی بالاتری نسبت به استراتژی دوم دارند.



شکل ۵-۲۳: وضعیت آسایش حرارتی مترو در دمای  $15^{\circ}\text{C}$  در صورتی که فن ایستگاه و دستگاه ایرواشر در سیستم تهویه حضور نداشته باشند.

#### ۵-۶-۳-۴- استراتژی چهارم

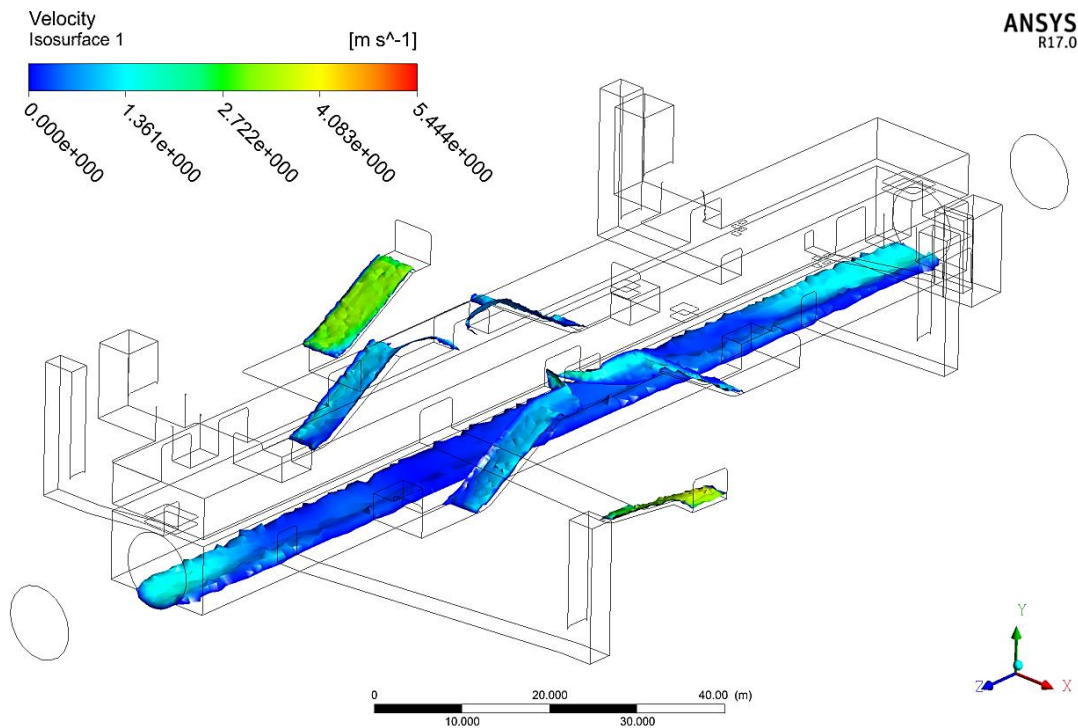
مطالعه پارامتری نشان می‌دهد که چنانچه دما در سطح شهر مشهد کمتر از  $11^{\circ}\text{C}$  شود نیاز به دستگاه ایرواشر و فن ایستگاه نیست و همچنین برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی باید از تجهیزات گرمایشی استفاده شود. در شکل ۵-۲۴ سطوح مربوط به دمای  $24^{\circ}\text{C}$  نمایش داده شده است این سطوح بر اساس سرعت هوا رنگ‌بندی شده‌اند.



شکل ۵-۲۴: سطوح مربوط به دمای  $24^{\circ}\text{C}$  در صورتی که دمای شهر مشهد  $11^{\circ}\text{C}$  باشد.

با توجه به شکل ۵-۲۴ مشخص می‌شود که در صورتی که بخواهیم از استراتژی چهارم استفاده کنیم در بیشترین حالت دمایی آن یعنی دمای  $11^{\circ}\text{C}$  تنها قسمت‌های کمی از مترو دارای دمای  $24^{\circ}\text{C}$  و این قسمت‌ها مناطق نزدیک به منابع حرارتی می‌باشند که شامل کف مسیر حرکت قطار در سکو و پله برقی‌ها هستند. قطعاً در دماهای پایین‌تر از دمای  $11^{\circ}\text{C}$  بخش‌های کمتری از مترو دارای حداقل شرایط آسایش حرارتی هستند. در صورتی که سطوح مربوط به دمای  $24^{\circ}\text{C}$  را در حالت متوسط دمای فصل زمستان یعنی دمای  $0^{\circ}\text{C}$  بررسی کنیم متوجه می‌شویم که تنها سطوح منابع حرارتی دارای دمای

۲۴°C هستند و قسمت‌های عمومی مترو از دمای کمتری برخوردار است (شکل ۵-۲۵)؛ این بدان معناست که باید در قسمت‌های مهم همچون مناطق تجاری و اداری از وسایل گرمایشی استفاده شود. این وضعیت قبلاً در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۵: سطوح مربوط به دمای ۲۴°C در صورتی که دمای شهر مشهد ۰°C باشد.

## ۵-۸- اعتبار سنجی

اعتبار سنجی این پایان‌نامه طی دو مرحله صورت گرفت در مرحله اول فن مورد نیاز که از مدل‌سازی CFD بدست آمده است با فن اجرایی که توسط شرکت زیترن طراحی و ساخته شده است مقایسه شد. در مرحله دوم برای بررسی مدل ساخته شده و کیفیت آن به اندازه‌گیری سرعت هوا و دمای هوا در قسمت‌های مختلف مترو پرداخته شد و نتایج حاصل از مدل‌سازی و نتایج واقعی با هم مقایسه شد.

## ۵-۸-۱- اعتبار سنجی با استفاده از طرح اجرایی

طرح اجراشده برای سیستم تهویه مترو مشهد توسط شرکت زیترن انجام شده است. این شرکت تعداد ۴ فن اصلی با نرخ جریان حجمی  $135 \text{ m}^3/\text{s}$  برای هر ایستگاه و ۷ فن محوری کاملاً دو جهتی برای قسمت‌های مختلف هر ایستگاه را طراحی و به شرکت قطار شهری مشهد واگذار کرده است. فن‌های مربوط به داخل ایستگاه‌ها قابلیت معکوس‌پذیری ۱۰۰٪ را دارند و دارای جریان حجمی  $13/5 \text{ m}^3/\text{s}$  تا  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  می‌باشند.

با استفاده از مدل CFD فن‌های اصلی برای هر ایستگاه دو فن و هر کدام با نرخ جریان حجمی  $\text{m}^3/\text{s}$   $125/2$  به دست آمد. فن مربوط به داخل ایستگاه در مدل CFD با نرخ جریان حجمی  $22/5 \text{ m}^3/\text{s}$  برای تهویه تراز کنترل بلیط به دست آمد.

شرکت زیترن برای هر ایستگاه چهار فن اصلی که دو عدد از آن‌ها همواره مشغول به کار در دو طرف ایستگاه و دو عدد دیگر برای مواقع اضطراری آماده‌به‌کارند را طراحی و اجرا کرده است. از طرفی در داخل هر ایستگاه تنها یک فن در بیشتر مواقع در حال کار کردن است و مابقی فن‌ها در حالت اضطراری همچون آتش‌سوزی به کار گرفته می‌شوند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تهویه مترو به کمک CFD اختلاف کمی با نتایج طرح اجرایی را دارد و مقدار خطای  $7/5\%$  در مدل‌سازی وجود دارد. مشاهده می‌شود که فن‌های نصب‌شده در مترو مشهد دبی حجمی بیشتری نسبت به نتایج حاصل از شبیه‌سازی دارند. این مقدار خطا بنا به دلایل زیر منطقی است.

(۱) مدل‌سازی CFD بدون در نظر گرفتن ایرواشر و فیلتر هوای مربوط به سیستم تهویه در نظر گرفته شده است. بنابراین باید فن اصلی برای مقابله با ایرواشر و فیلتر هوا از قدرت بیشتری برخوردار باشد.

(۲) در مدل‌سازی CFD طول ابتدای ایستگاه و شفت اصلی تهویه در نظر گرفته نشده است که این طول در ماکسیمم حالت خود می‌تواند ۵۰۰ متر باشد.

۳) طراحی و ساخت فن توسط شرکت‌های فن سازی همواره محتاطانه انجام می‌شود به گونه‌ای

که قدرت فن ساخته شده بیشتر از مقدار موردنیاز باشد.

با توجه به آنچه در بالا گفته شد مقدار اختلاف در نتایج مدل سازی و مقادیر واقعی منطقی به نظر

می‌رسند.

### ۵-۸-۲- اعتبار سنجی با استفاده از اندازه‌گیری سرعت و دمای هوا

اعتبارسنجی با اندازه‌گیری سرعت و دمای هوا به کمک دستگاه ABH-4225 در ایستگاه طبرسی خط ۲

مترو مشهد انجام گرفت و نتایج حاصل از اندازه‌گیری دستگاه با نتایج مربوط به مدل CFD ساخته شده

مقایسه شد. این دستگاه قادر است تا سرعت، دما، فشار و رطوبت هوا را اندازه‌گیری کند.

واحدهای اندازه‌گیری، دقت اندازه‌گیری، میزان خطا و بازه اندازه‌گیری هر یک از واحدهای سرعت

توسط دستگاه ABH-4225 در جدول ۵-۱۷ بیان شده است.

جدول ۵-۱۷: واحدهای اندازه‌گیری سرعت توسط دستگاه ABH-4225

خطا	بازه اندازه‌گیری	دقت	واحد اندازه‌گیری
متر بر ثانیه $\leq 20$	۰/۱ - ۳۰	۰/۱	متر بر ثانیه (m/s)
۳ درصد	۱/۴ - ۱۰۸	۰/۱	کیلومتر بر ساعت (Km/h)
متر بر ثانیه $> 20$	۸۰ - ۵۹۱۰	۱	فوت بر دقیقه (fpm)
۴ درصد	۰/۹ - ۶۷	۰/۱	مایل بر ساعت (mpf)
۴ درصد	۰/۸ - ۵۸/۳	۰/۱	گره دریایی (knot)

این دستگاه می‌تواند در دماهای عملیاتی  $0^{\circ}\text{C}$  تا  $50^{\circ}\text{C}$  به کار گرفته شود. واحدهای اندازه‌گیری

برای دما C و F هستند. نمایشگر این دستگاه می‌تواند پارامترها را به صورت دوتایی در یکی از حالات

زیر نمایش دهد.

• رطوبت/ دما

• رطوبت/ نقطه شبنم

- سرعت / دما
- فشار / دما
- فشار / رطوبت
- فشار / سرعت

برای اعتبار سنجی مدل CFD ساخته شده از حالت سرعت/ دما استفاده شده است. در شکل ۵-

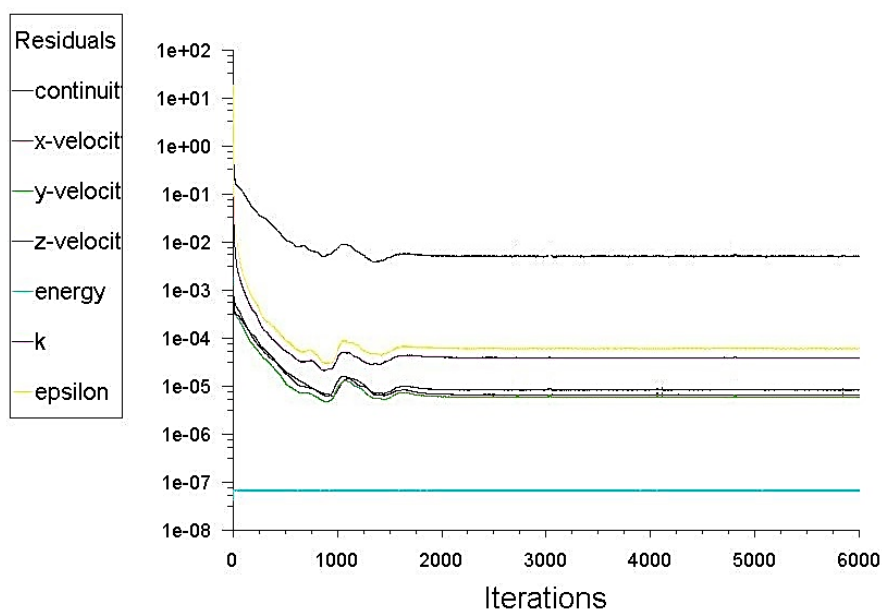
۲۶ تصویر این دستگاه نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۶: دستگاه اندازه‌گیری سرعت و دمای هوا (دستگاه ABH-4225).

خط ۲ مترو مشهد بهمن ماه سال ۱۳۹۵ در صورتی افتتاح شد که سیستم تهویه آن به صورت کامل نصب نشده بود و تنها ۶ ایستگاه شمالی آن (فاز ۱) بهره برداری شد. در این وضعیت ساخت برخی قسمت‌های ایستگاه‌ها نیمه‌کاره بود که معمولاً شامل قسمت‌های مربوط به راهروهای خروج اضطراری و ورودی‌های هوای اضطراری در ایستگاه می‌شود. چون سیستم تهویه و راهروهای خروجی به طور کامل راه‌اندازی نشده بودند شرکت بهره‌برداری قادر به استفاده حداکثری از مترو نبوده و تنها می‌توانست که از ساعت ۶ الی ۱۳ به مدت ۷ ساعت و با فاصله ۲۰ دقیقه از هم قطارها را برای حمل مسافران به حرکت در بیاورد. این در حالی است که خدمات دهی خط ۲ برای کار از ساعت ۶ صبح تا ساعت ۲۳ و با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه عبور قطار در زمان کار متراکم پیش‌بینی شده است.

اندازه‌گیری سرعت و دمای هوا در هنگام اجرای آزمایشی نصب اولیه فن‌های تهویه صورت گرفت. متناسب با شرایط آزمایشی مدل CFD با شرایط مرزی یکسان اجرا شد. در اجرای آزمایشی فن‌ها با دبی حجمی کمتر از  $135 \text{ m}^3/\text{s}$  مشغول به کار بودند که با اندازه‌گیری انجام شده سرعت هوا در دهانه ورودی به تونل  $1/2 \text{ m/s}$  و دمای هوا  $22^\circ\text{C}$  به دست آمد. در این وضعیت تمام خروجی‌های اضطراری بسته بودند و تنها معابر عابر پیاده باز بود و همچنین ورودی و خروجی‌های هوا به ایستگاه در تراز کنترل بلیط بسته و فن ایستگاه نیز در اجرای آزمایشی نصب نشده بود. اجرای آزمایشی در صورتی انجام گرفت که حمل مسافر توسط مترو انجام نمی‌گرفت و یک ساعت بعد از ساعت کاری مترو یعنی در ساعت ۱۴ انجام شد. در این حالت حرکت قطارها و پله‌برقی‌ها متوقف شده بودند و در نهایت مدل CFD متناسب با این شرایط اجرا شد. در شکل ۵-۲۷ نمودار همگرایی باقی‌مانده‌های مربوط به مدل CFD متناسب با شرایط اجرایی نشان داده شده است. با توجه با این شکل مشاهده می‌شود که معادله انرژی خیلی سریع همگرا شده است. همگرایی سریع معادله انرژی به این خاطر است که انرژی در مدل فعال بوده ولی تنها قسمت‌هایی که انرژی در آنها دخیل است مربوط به دمای ورودی و خروجی است.



شکل ۵-۲۷: نمودار همگرایی باقی‌مانده‌های مربوط به مدل CFD ساخته شده متناسب با شرایط اندازه‌گیری.

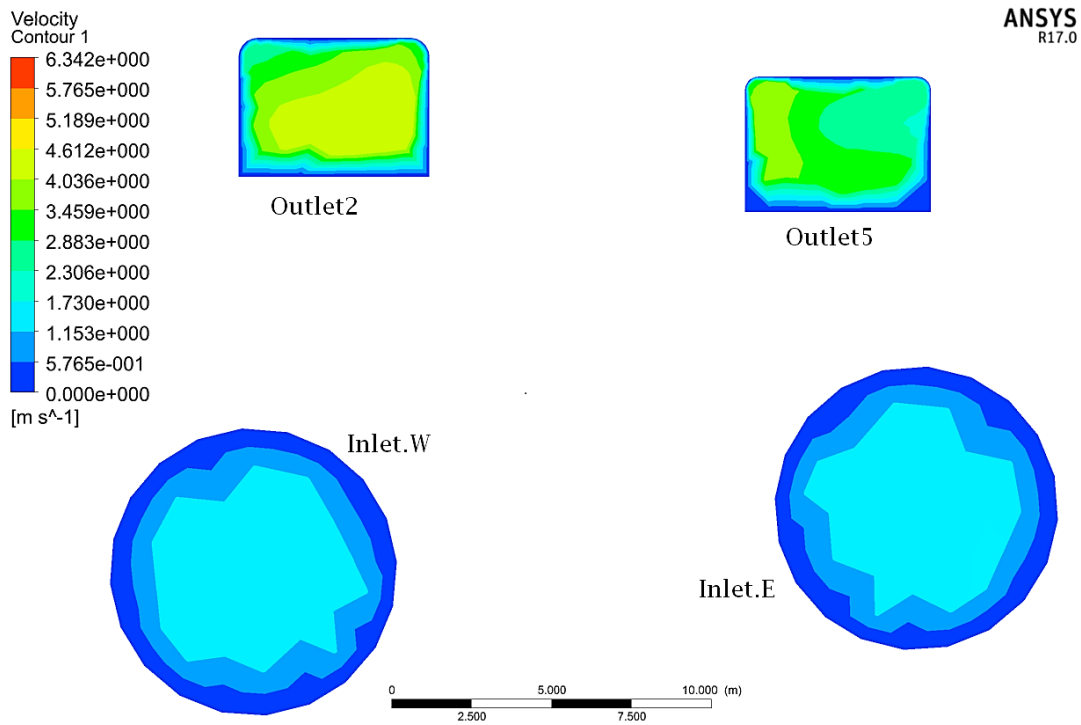


در جدول ۵-۱۸ نتایج حاصل از اندازه‌گیری واقعی و نتایج مدل CFD با هم مقایسه شده است. با توجه به مقایسه نتایج واقعی و نتایج اندازه‌گیری شده مقداری اختلاف دما و سرعت بین نتایج واقعی و نتایج حاصل از مدل CFD وجود دارد. اختلاف در دما به این دلیل است که شرط حرارتی برای مرزهای پله برقی‌ها، ترمزگیری و شتاب‌گیری در مدل CFD بدون انتقال گرما در نظر گرفته شد ( $\text{Heat Flux} = 0$ ) این در حالی است که مقداری گرما در محیط از زمان کار مترو وجود دارد که باعث می‌شود دمای اندازه‌گیری شده در دهانه‌های گذرگاه عابر پیاده بیشتر نشان داده شود.

جدول ۵-۱۸: مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری واقعی و نتایج مدل CFD.

مقدار خطا		نتایج مدل CFD		نتایج واقعی		
دما	سرعت	دما °C	سرعت m/s	دما °C	سرعت m/s	
---	---	۲۲	۱/۲	۲۲	۱/۲	ورودی غربی هوا و مسیر حرکت قطار
---	---	۲۲	۱/۲	۲۲	۱/۲	ورودی شرقی هوا و مسیر حرکت قطار
٪ ۱۶	٪ ۱۵	۲۲	۳/۵	۲۵/۹	۳	ورودی و خروج مسافران (جنوبی)
٪ ۵	٪ ۱۴	۲۲	۳	۲۳/۲	۲/۶	ورود و خروج مسافران (شمالی)

در رابطه با سرعت هوا در خروجی‌ها علت کم بودن نتایج واقعی نسبت به نتایج مدل CFD این است که درهای دو خروجی اضطراری به طور کامل بسته نبودند و مقداری هوا از آنها خارج می‌شد. علت دیگر می‌تواند این باشد که اندازه‌گیری با دستگاه در مرکز، سطح مقطع معابر خروجی‌ها اندازه‌گیری شد حال آن که نتایج حاصل از نرم‌افزار سرعت متوسط سطح را نشان می‌دهد در شکل ۵-۲۸ کنتورهای مربوط به سرعت هوا در مقاطع اندازه‌گیری شده نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۸: کنتورهای سرعت در دهانه ورودی و خروجی‌های مدل CFD ساخته شده برای اعتبار سنجی.

برای بررسی تاثیر خروجی اضطراری (Outlet6) مدل CFD ساخته شده یک بار دیگر با شرایط مرزی جدید که در آن خروجی اضطراری مانند مدل اصلی طراحی و اجرا شد در این حالت نتایج قابل قبول بوده و این نتایج در جدول ۵-۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۹: مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری واقعی و نتایج مدل CFD و تاثیر خروجی اضطراری.

مقدار خطا		نتایج مدل CFD		نتایج واقعی		
دما	سرعت	دما °C	سرعت m/s	دما °C	سرعت m/s	
---	---	۲۲	۱/۲	۲۲	۱/۲	ورودی غربی هوا و مسیر حرکت قطار
---	---	۲۲	۱/۲	۲۲	۱/۲	ورودی شرقی هوا و مسیر حرکت قطار
٪ ۱۶	٪ ۷	۲۲	۲/۸	۲۵/۹	۳	ورودی و خروج مسافران (جنوبی)
٪ ۵	٪ ۴	۲۲	۲/۵	۲۳/۲	۲/۶	ورود و خروج مسافران (شمالی)

## ۹-۵- جمع بندی

نتایج حاصل از مدل سازی CFD سیستم تهویه مترو مشهد نشان داد که چه فن هایی و با چه قدرتی برای تهویه مترو مشهد لازم است. با مطالعات پارامتری حالت های مختلف دمایی برای سیستم تهویه مترو بررسی شد و برای عملکرد بهتر سیستم تهویه چهار استراتژی پیشنهاد شد. به طور خلاصه می توان با کمک CFD جدول ۵-۲۰ را برای شرایط دمایی مختلف شهر مشهد ارائه داد.

جدول ۵-۲۰: انتخاب استراتژی های مختلف در شرایط دمایی متفاوت.

نحوه عملکرد	پیشنهاد استراتژی	وضعیت دمایی
استفاده از تمام فن ها و دستگاه هواشوی	استراتژی اول	دماهای بالای $21^{\circ}\text{C}$
استفاده از تمام فن ها و عدم استفاده از دستگاه هواشوی	استراتژی دوم	$15^{\circ}\text{C}$ تا $20^{\circ}\text{C}$
تنها استفاده از فن های اصلی کافی است	استراتژی سوم	$11^{\circ}\text{C}$ تا $17^{\circ}\text{C}$
استفاده از فن های اصلی در سرعت های کمتر و در برخی قسمت ها نیاز به وسایل گرمایشی	استراتژی چهارم	کمتر از $11^{\circ}\text{C}$

فصل هشتم

تیجہ گیری و پیشہاوا

## ۶-۱- نتیجه گیری

طراحی سیستم تهویه برای مترو در مرحله بهره‌برداری باید به‌گونه‌ای انجام شود که در مواقع عادی قادر باشد تا شرایط آسایش حرارتی را برای مسافران فراهم کند و در شرایط اضطراری یک محیط امن برای تنفس مسافران ایجاد کند. مدل‌سازی CFD برای طراحی و بررسی سیستم تهویه ابزار قدرتمندی محسوب می‌شود که امروزه در علم تهویه از آن استفاده‌های زیادی می‌شود. برای سیستم تهویه مترو مشهد با استفاده از مدل‌سازی CFD سیستم تهویه موردنیاز طراحی و به بررسی آن پرداخته شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج مربوط به طرح اجرایی اختلاف اندکی داشت و نشان داد که مدل ساخته شده از دقت خوبی برخوردار است.

در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی CFD و به کمک مطالعه پارامتری فن‌های موردنیاز تهویه مشخص شد؛ همچنین سیستم تهویه در شرایط دمایی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و استراتژی‌های لازم جهت مقابله با شرایط دمایی مختلف ارائه شد. مدل‌سازی CFD این امکان را فراهم می‌کند تا با طراحی یک مدل دقیق از تهویه مترو و بررسی حالات‌های مختلف که ممکن است در طول سال اتفاق بیفتد استراتژی لازم جهت تهویه بهتر انتخاب شود. شناخت رفتارهای مختلف سیستم تهویه در شرایط آب و هوایی مختلف یک سال باعث می‌شود تا آمادگی لازم جهت مقابله با شرایط خاص را قبل از اتفاق افتادن به دست بیاوریم. مطالعات پارامتری نشان می‌دهد که استفاده از تمام قسمت‌های سیستم تهویه در فصل‌های مختلف سال لازم نیست؛ برای فصل‌های مختلف باید استراتژی‌های متفاوتی را جهت ایجاد آسایش حرارتی پیش رو بگیریم. نتایج حاصل از مدل‌سازی CFD نشان داد که برای سیستم تهویه مترو مشهد چهار استراتژی لازم است.

مدل‌سازی CFD به ما این امکان را می‌دهد تا بعد از بررسی لزوم یا عدم لزوم استفاده از دستگاه ایرواشر به بررسی قسمت‌هایی بپردازیم که از نظر آسایش حرارتی وضعیت نامناسبی دارند. در این تحقیق مشخص شد مسیر عابران پیاده بین دو طبقه و سکوی سوارشدن مسافری به قطار دارای بار حرارتی

بیشتری نسبت به دیگر قسمت‌های ایستگاه است. با توجه به این که مدل‌سازی نشان می‌دهد که سرعت جریان هوا در راهروها و پله‌های بین دو طبقه نسبت به سکو بیشتر است بنابراین در شرایط دمایی یکسان در راهروها و پله‌ها گرمای کمتری احساس می‌شود. این بدان دلیل است که جریان هوا باعث می‌شود که انسان کمتر عرق کند و در نتیجه کمتر احساس گرما کند.

بررسی‌های مربوط به استقلال از شبکه نشان داد که مدل ساخته شده جواب‌های دقیقی را در اختیار ما قرار می‌دهد و مدل ساخته شده قابل اطمینان است.

## ۶-۲- پیشنهادها

با توجه به این که مدل ساخته شده از دقت خوبی برخوردار بود می‌توان گفت که علم CFD می‌تواند کمک بزرگی به طراحان سیستم تهویه بکند چه در مورد تهویه مترو و ساختمان‌های بزرگ و چه در مورد معادن زیرزمینی. امروزه گسترش علم و به وجود آمدن کامپیوترهای پرسرعت به ما کمک می‌کند تا بجای استفاده از روش‌های قدیمی که شامل محاسبات سنگین و استفاده از نمودارها بوده است از علم CFD برای طراحی سیستم تهویه استفاده کنیم. برای گسترش تحقیق در زمینه مشابه با موضوع این پایان‌نامه و یا موارد مربوط به تهویه پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود.

۱) مطالعات مربوط به CFD به ما این امکان را می‌دهد که قسمت‌های مختلف یک مدل را بررسی کرده و خطرات ناشی از عدم تهویه مناسب و یا تهویه نامناسب را شناسایی کرده و برای رفع آن‌ها اقدام کنیم.

۲) سیستم مترو امروزه به گونه‌ای ساخته می‌شود که تجهیزات داخل آن نسوز و در مقابل حرارت مقاوم باشند. چنانچه آتش‌سوزی در مترو اتفاق بیفتد دود و مضرات آن خطرات جدی‌تری نسبت به شعله آتش دارد. با توجه به این که CFD به ما این امکان را می‌دهد که دود و آتش را شبیه‌سازی کنیم بنابراین مطالعه و تحقیق در این زمینه به محققین پیشنهاد می‌شود.

۳) با توجه به این که فن‌های سیستم تهویه قادر به کار کردن در سرعت‌های مختلف هستند با استفاده از CFD می‌توان تأثیر کاهش دور فن‌ها را در شرایط خاص بررسی کرد. برای مثال در سیستم مترو در فصل زمستان با کاهش دور فن و در نتیجه کاهش سرعت هوا می‌توان تا حدودی گرمایی موردنیاز در زمان‌های سرد سال را فراهم کرد تا نیاز به سیستم گرمایشی نباشد.

۴) با توجه به این که در معادن زیرزمینی و مخصوصاً معادن زغال‌سنگ مشکلات ناشی از انفجار خسارات جبران‌ناپذیری را به همراه دارد با استفاده از علم CFD می‌توانیم مشکلات ناشی از عدم تهویه مناسب و قسمت‌های مستعد انفجار را شناسایی و برای برطرف کردن مشکلات آن اقدام کنیم.

۵) یکی از مشکلات بزرگ در انفجار معادن زغال‌سنگ بعد از انفجار اولیه گسترش کرد زغال و در نتیجه گسترش آتش‌سوزی و انفجارهای ثانویه است با استفاده از مدل‌سازی چند فازی می‌توانیم رفتار گرد زغال را در موقع انفجار و بعد از انفجار بررسی کنیم که این بررسی منجر به شناخت قسمت‌های حساس و راهکارهای مناسب جهت کنترل گرد زغال خواهد شد.

۶) از جمله خدمات فنی در معادن انتقال هوای فشرده و آب‌کشی در برخی معادن است چون این موارد با سیال سروکار دارند بنابراین می‌توانیم از CFD برای بررسی تأسیسات مربوط به آب‌کشی و یا انتقال هوای پرفشار استفاده کنیم.

# منابع

- [۱]. ادیبی س. و جعفری م، (۱۳۹۳) "بررسی شرایط آسایش حرارتی و شبیه سازی عددی سیستم تهویه ایستگاه‌های سکو-کنار" *کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع*, شماره ۵.
- [۲]. مدنی ح. و اسدی داودآبادی ع. (۱۳۸۵) "طراحی سیستم تهویه تونل‌های مترو تهران-مطالعه موردی حدفاصل ایستگاه‌های مولوی- شوش" *کنفرانس تونل ایران*, شماره ۷, ص ۱۱۱۷-۱۱۳۳.
- [۳]. Yuan F.D. and You S.J. (2007) "CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform" *China, Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 22, pp. 474-482.
- [۴]. گلشاهی فر م. (۱۳۹۲) "فلوئنت کاربردی" *جلد دوم، انتشارات صانعی شه‌میرزادی، تهران*. ص ۱۶-۹.
- [۵]. سخنگوی قطار شهری مشهد، (۱۳۹۱) "روزنامه مردم شهر مشهد" *عنوان خبر: بهره‌برداری از خط ۲ قطار شهری مشهد تا سال ۹۵. مشهد شهر آرا*.
- [۶]. مرکز مطالعات و تحقیقات حمل‌ونقل (ممتحن). (۱۳۷۷) "مطالعات جامع حمل‌ونقل مشهد- مرحله دوم" *تهران دانشگاه صنعتی شریف، خلاصه گزارش فرایند مدل‌سازی*.
- [۷]. [www.ghasednews.com](http://www.ghasednews.com). "قطار شهری مشهد" *مشهد پیام، تاریخ خبر: ۲۳ دی‌ماه ۱۳۹۳*. کد خبر: ۳۷۹۹.



[۸]. murco.ir. "آرشیو اخبار شرکت قطار شهری مشهد" قطار شهری مشهد، آرشیو خبر، خبرهای مربوط به خط ۲، تاریخ خبر اسفند ۱۳۹۴.

[۹]. مهندسین مشاور ساحل (۱۳۸۸). "گزارش ژئوتکنیک مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد".

[۱۰]. A. Hameed, (2002) "Environmental study in metro station in cairo" J. occup. Health, Vol 44. Pp:112-118

[۱۱]. مصری ی. کیانی فر ع. و مرواریدی م. (۱۳۹۱) "طراحی سیستم تهویه تونل و مقابل با خطرات آتش در خط یک قطار شهری مشهد" همایش ملی تهویه و بهداشت صنعتی، شماره ۳.

[۱۲]. Corporation, T.D. (1975) "Subway Environmental Design Handbook: Principles and applications". Vol. 1. The Corporation

[۱۳]. Li Jojo S.M. and Chow W.K. (2003) "Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety" Tunnelling and Underground Space Technology Vol 18, pp. 435-452.

[۱۴]. Kwa G.S. (2004) "The Design of Tunnel Ventilation System for a Long Vehicular Tunnel" Tunnelling and Underground Space Technology .

[۱۵]. Yuandong H, Tae H. H. and Chang N.K (2012) "A numerical simulation of train-induced unsteady airflow in a tunnel of Seoul subway" Journal of Hydrodynamic, Mechanical Science and Technology Korea , Vol. 24, pp. 785-792.

[۱۶]. شجاعی فرد م. و نورپو ع. (۱۳۷۹) "مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی CFD" چاپ سوم، انتشارات علم و صنعت ایران، ص ۱-۱۲۱.

[۱۷]. Isidro D, Susana T, Javier T, Mario M. and Malcolm G. (2011) "A practical use of CFD for ventilation of underground works" Tunnelling and Underground Space Technology. Vol 26, pp. 189-200.

[۱۸]. جان‌دی‌اندرسون ج. (۱۳۸۰) "دینامیک سیالات محاسباتی اصول و کاربرد" ترجمه مه‌رایبان م. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۱۲-۱۱۴.

[۱۹]. Marlair G, Carvel R, Beard A, and Thomas T. (2005) "The handbook of tunnel fire safety" London, pp 200-231.

[۲۰]. مدنی ح. و بخشنده‌امینه ح. (۱۳۷۹) "طراحی سیستم تهویه خط ۴ مترو تهران" همایش/ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست در معادن و صنایع معدنی، شماره ۳.

[۲۱]. Wu Y. and Bakar M.Z.A. (2000) "Control of smoke flow in tunnel fres using longitudinal ventilation systems a study of the critical velocity" Fire Safety Journal, Vol. 35, pp. 363-390

[۲۲]. Bettelini M, Brandt R. and Riess I. (2001) "Progress in Tunnel Ventilation – The Mont-Blanc Tunnel. Milano" World Tunnel Congress,

[۲۳]. Cheng L.H, Ueng T.H. and Liu C.W (2001) "Simulation of ventilation and fire in the underground facilities" Fire Safety Journal, Vol 36, pp. 597–619.

[۲۴]. Chena K.S. , Chung, Chung-Yi and Wang, S.W, (2002) "Measurement and Three-Dimensional Modeling of Airflow and Pollutant Dispersion in an Undersea Traffic Tunnel" Air & Waste Management Association, Vol. 52, pp. 349-363.

[۲۵]. Falin C, Guo S.C. and Chuay H.Y. (2002), "Smoke Control of Fires in Subway Stations" Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Vol 16, pp. 349–368.

[۲۶]. Chen F. Chien S.W. Jang H.M. and Chang W.J. (2003), "Stack effects on smoke propagation in subway stations". Continuum Mech. Thermodyn, Vol 15 pp. 425-440.

[۲۷]. مدنی ح. الماسی س. و گلیان م. (۱۳۸۳) "طراحی سیستم تهویه تونل امیرکبیر" کنفرانس مهندسی معدن/ایران، شماره ۸۳.

[۲۸]. Fukuyo K. (2006) "Application of computational fluid dynamics and pedestrian-behavior simulations to the design of task-ambient air-conditioning systems of a subway station" Energy, Vol31, pp. 706–718.

[۲۹]. Kim J.Y. and Kim, K.Y. (2007) "Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway" Tunnelling and Underground Space Technology, Vol22, pp. 166–172.

[۳۰]. Kwon S.B, Cho Y. Park D. and Park E.Y. (2008) "Study on the Indoor Air Quality of Seoul Metropolitan Subway during the Rush Hour" Indoor Built Environ, pp. 361–369.

[۳۱]. عباسپور م. منصورى ن. جعفرى م. و الهيارى م. (۱۳۸۷) "بررسى وضعيت قطارهاى متروى تهران از نظر آسائش حرارتى" همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، شماره ۲.

[۳۲]. Roh J.S, Ryou H.S, Park W.H. and Jang Y.J. (2009) "CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire" Tunnelling and Underground Space Technology, Korea, Vol. 24, pp. 447–453.

[۳۳]. Kim J.Y. and Kim K.Y. (2009) "Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 97, pp. 174–179.

[۳۴]. Hui Y. Li J. and Lixin Y. (2009) "Numerical analysis of tunnel thermal plume control using longitudinal ventilation" Fire Safety Journal, Vol44, pp. 1067–1077.

[۳۵]. Jia L. Peng H.P. and Yang L. (2009) "Numerical Simulation of Flow Characteristics in a Subway Station" Heat Transfer-Asian Research, Vol 38, pp.50-62.

[۳۶]. مداحیان ر. افشین ح. و نجفی یزدی م. (۱۳۸۸) "رویکرد ناحیه‌ای در طراحی سناریوهای آتش‌سوزی در ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو" همایش ملی تهویه صنعتی و بهداشت، شماره ۱.

[۳۷]. هاشمی س. فرهانیه ب و کاظمی پور ع. (۱۳۸۸) "طراحی سیستم تهویه تونل جاده‌ای درون‌شهری" همایش ملی تهویه صنعتی و بهداشتی، شماره ۱.

[۳۸]. Ren T. and Balusu R (2010) "The use of CFD modelling as a tool for solving mining health and safety problems" Underground Coal Operators Wollongong, pp. 338-349.

[۳۹]. Chow W.K, Wong K.Y and Chung W.Y. (2010) "Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling" Tunnelling and Underground Space Technology, Hong Kong , Vol. 25, pp. 122-128.

[۴۰]. علیزاده ح. (۱۳۹۰) "طراحی سیستم تهویه تونل دوطبقه بزرگراه شهید صیاد شیرازی در دور بهره‌برداری" همایش ملی تونل، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، شماره ۹.

[۴۱]. Juraeva M. Lee J.h. and Song D.J. (2011) "A computational analysis of the train-wind to identify the best position for the air-curtain installation" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 99, pp. 554-559.

[۴۲]. Binbin W. (2011) "Comparative Research on FLUENT and FDS's Numerical Simulation of Smoke Spread in Subway Platform Fire" First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, China, Vol. 26, pp. 1065-1075.

[۴۳]. Wang H.D, Wang S.Y. and Ban X.G (2011) "Numerical Simulation on Accident Ventilation Modes in Subway Tunnel Fire" International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP), Vol. 11, pp. 2148-2159.

[۴۴]. نیکنام ب. شهریار ک. و مدنی ح. (۱۳۹۰) "طراحی سیستم تهویه قلاجه حین آتش‌سوزی" همایش ملی تهویه و بهداشت صنعتی، شماره ۳.

[۴۵]. شهبازی س. امجدی م. و حیدری نژاد ق. (۱۳۹۱) "طراحی سیستم تهویه برای تونل شهری نیایش" کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، شماره ۴.

[۴۶]. نیکنام ب. شهریار ک. و مدنی ح. (۱۳۹۱) "طراحی سیستم تهویه تونل کوهسار شمالی حین آتش‌سوزی" همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، شماره ۲۰.

- [۴۷]. مدنی ح. و نیکنام ب. (۱۳۹۰) "مدل‌سازی توزیع گازمتان در جبهه کارهای پیشروی معادن با استفاده دینامیک سیالات محاسباتی" *کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن*، شماره ۸.
- [۴۸]. شهبازی س. و حیدری نژاد ق. (۱۳۹۱) "شبیه‌سازی آلودگی در تونل به روش CFD و مقایسه با استاندارد پیارک" *همایش ملی تهویه و بهداشت صنعتی*، شماره ۳.
- [۴۹]. Gao R. Angui L. Xinpeng H. Wenjun L. Yujiao Z. and Baoshun D. (2012) "Fire-induced smoke control via hybrid ventilation in a huge transit terminal subway" *Energy and Buildings*, Vol. 45, pp. 280-289.
- [۵۰]. Gao R. Angui L. Xinpeng H. Wenjun L. and Baoshun D. (2012) "Prediction of the spread of smoke in a huge transit terminal subway station under six different fire scenarios" *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 31, pp. 128–138.
- [۵۱]. ادیبی س. و جعفری م. (۱۳۹۱) "بررسی روش‌های کاهش گرمای تولیدی در ایستگاه‌ها و تونل‌های زیرزمینی" *کنفرانس دانشجویی مهندسی مکانیک*، شماره ۷.
- [۵۲]. دستان ع. ابوعلی الف. و نایینی ن. (۱۳۹۲) "شبیه‌سازی زمانمند تهویه در تونل مترو در شرایط بروز حریق" *کنفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه‌آهن*، دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۳.
- [۵۳]. Na L. Angui L. Ran G. Tongyang S. Wei Z. and Zhipei H. (2014) "Performance of smoke elimination and confinement with modified hybrid ventilation for subway station" *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol43 , pp. 140–147.
- [۵۴]. Guang X. Edmund C.J. Kray D.L. Saad A. R. and Michael E.K. (2015) "Remote characterization of ventilation systems using tracer gas and CFD in an underground mine" *Safety Science*, Vol. 74, pp. 140-149
- [۵۵]. مونسان م. طلایی م. و ملاطفی ح. (۱۳۹۵) "بررسی عوامل مؤثر بر سرعت بحرانی تهویه در تونل‌های مترو" *نشریه علمی پژوهشی/میرکبیر*، شماره ۴۸، ص ۵۱-۶۴.

[۵۶]. Ahmed A. Mahmoud A. Fouad Mahmoud and Khalil E.E. (2016) "Smoke Spread in Underground Metro Station" Cairo University Giza Egypt, Thermal & Environmental Engineering, Vol. 12. 95-103.

[۵۷]. مقيمان م. (۱۳۸۴). "مهندسی تهويه مطبوع و حرارت مرکزی" چاپ دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۵-۳۷.

[۵۸]. فتاحی فرادنبه الف. (۱۳۹۴) "الزامات پدافند غیرعامل در طراحی سیستم تهويه تونل‌های مترو به منظور نجات مصدومین" کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، شماره ۳.

[۵۹]. موسسه تهويه مطبوع فردا (۱۳۸۲) "ماهنامه تهويه مطبوع" تهران، انتشارات یزدا، اسفند ۸۲، ص ۳۸-۴۸.

[۶۰]. مدنی ح (۱۳۸۹) "تهويه در معادن" جلد اول، چاپ سوم، مرکز نشر دانشگاهی، ص ۲۰۰-۴۶۱.

[۶۱]. طباطبائی س. (۱۳۸۶) "محاسبات تأسیسات ساختمان" چاپ اول، انتشارات فاروس ایران، ص ۱۱۸-۱۸۴.

[۶۲]. Moreno T, Perez N, Reche C, Martins V, Miguel E.D, Capdevila M, Centelles S, Minguillón M.C, Amato F, Alastuey A, Querol X. and Gibbons W. (2014) "Subway platform air quality: Assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design" Atmospheric Environment, Vol. 92. 461-468.

[۶۳]. مک داوال ر. (۱۳۹۳) "مرجع کاربردی تهويه مطبوع" ترجمه دهقان م. چاپ اول، انتشارات یزدا تهران، ص ۴۹-۸۲.

[۶۴]. سی هریس ن. (۱۳۸۳) "تهويه مطبوع" ترجمه پورسید م. چاپ دوم، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی تهران، ص ۱۵۲-۳۰۰.

[۶۵]. Service R. (1985) "**Subway Environmental Design Handbook Vol. I Principles and Applications**" By National Technical Information. Washington Urban Mass Transportation Administration Office of Research and Development, pp. 30-196.

[۶۶]. Urban, Railway Mashhad. (2016) "Zitron Company for Mashhad Subway Report" Mashhad Subway.

[۶۷]. Bickel J.O, Kuesel T.R and King E.H. (1991) "**Tunnel Engineering Handbook**" Boston, Dordrecht, London, Kluwer Academic Publication, pp. 384-439.

[۶۸]. محجوب الف. (۱۳۸۸) "**طراحی سیستم‌های تهویه تونل‌های راه**" چاپ اول، انتشارات وزارت راه و ترابری پژوهشکده حمل‌ونقل تهران، ص ۳۵-۱۳۷.

[۶۹]. حسین‌دخت ح. ضیایی س. امینی‌طوسی ه. و حسینی س. (۱۳۹۲) "ارزیابی و مطالعه خطرهای تهدیدات در تونل‌های درون‌شهری (با محوریت آتش‌سوزی غیرعمدی)" همایش مهندسی عمران و توسعه پایدار با محوریت کاهش خطرپذیری در بلایای طبیعی، شماره ۱.

[۷۰]. توحیدی الف. و قفاری قهرودی ه. (۱۳۹۲) "**راهنمای جامع ANSYS FLUENT (مقدماتی)**" جلد اول، چاپ اول، انتشارات موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران، ص ۱۲-۱۲۴.

[۷۱]. جبلی فرد س. رهگذر ر. و امیدوار، آ. (۱۳۸۲) "**دینامیک سیالات کاربردی**" چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ص ۱-۱۵.

[۷۲]. سی‌ویل کاکس د. (۱۳۹۰) "**مدل‌سازی در دینامیک سیالات محاسباتی**" ترجمه شهرخانی م، چاپ اول، انتشارات یزدا تهران، ص ۲۵-۶۰.

[۷۳]. توحیدی الف. (۱۳۹۳) "**راهنمای جامع ANSYS Workbench**" جلد دوم، چاپ اول، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری، ص ۱۵۴-۲۶۰.





## **Abstract**

One of the basic requirements for populated cities is high quality public transportation. Subway are very popular because of efficiency in time and cost and ease of use. Subway ventilation systems in the operation time is more important than drilling time and Should be designed to provide the air conditioning for the passengers and staff. CFD modeling helps us to find out the amount of air required and number of fans for ventilations of environment. In this research CFD modeling and parametric study was used to determine the volumetric flow rate and number of fans. ANSYS Workbench software used for modeling and solving. finite volume modeling was used for CFD modeling and for turbulence model standard k- $\epsilon$  was used. Given that the first phase Mashhad subway includes six stations and these stations is similar, only one model was built and the results used for all stations. using Airwasher and its impacts on air conditioning in summer was studied using CFD and finally, strategies was presented according to the weather conditions in the Mashhad city for efficient use of the subway system. The model was validated with two different methods. Model was compared with the plan Zitron company. Results indicate that the volume flow rate designed by the CFD model is Equal with volume flow rate fan made by Zitron company. For checking the speed and temperature and compare it with the CFD model VANE Anemometer Barometer Humidity/Temp device was used.

Keywords: Ventilation System, Computational Fluid Dynamics, Subway, CFD modeling, Fan, Airwasher





**Faculty of mining, Petroleum and Geophysics Engineering**

**M.Sc. Thesis in Mineral Exploitation**

**Designing ventilation systems for line 2 Mashhad subways by  
Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation**

By: Hossein Refahi

Supervisor:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. Ali Abbasnejad

Advisor:

Ehsan Dabagh Neyshabori

July 2017