بسم الله الرحمن الرحیم

بررسی و امکان سنجی بازیافت انرژی از دودکش بخاری با استفاده از جابجایی اجباری توسط شبیه سازی عددی و تطبیق آزمایشگاهی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

صادق شاکری

استاد راهنما

دکتر محمد امیری

۱۳۹۳

از پدرم که سفره زندگیم را با روزی حلال تزیین کرد و رنج و زحماتش را کمتر فهمیدم
از مادرم که عشق را از او آموختم و لحظه لحظه بالیدنم را مدیون لحظه لحظه مهربانیش می دانم
متشکرم و دستانشان را می بوسم.

از همسرم که در دوران زندگی مشترکمان با صبرو شکیبایی، ذره ای از حمایتش کم نکرد
از اساتیدی که زندگیشان را وقف تربیت شاگردان کردند و آرزویشان بالیدنشان است
متشکرم

و از خدا می خواهم که قدرشان را بیشتر بدانم...

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

این اثر را تقدیم به جانبازان موجی و قطع نخاعی می کنم، آنانکه فداکارترین شـــدند و رنج زندگی سخت را به جان خریدند تا آسوده زندگی کنم.

باشد که ذره ای از شرمندگیم کاسته شود...

چکیده

در این پژوهش نتایج تحقیق در مورد چگونگی بهبود بازده گرمایی بخاری گازی دودکشدار توسط یک سیستم خارجی قابل نصب ارائه شده است. آنچه تا پیش از این مورد توجه محققین درباره این موضوع بود؛ کم کردن هوای اولیه و ثانویه مخلوط شونده با گاز طبیعی یا محصولات احتراق، تغییر در زائده های درون تنور بخاری گازی یا استفاده از مکانیزم جایجایی اجباری برای کل بخاری و بدون استفاده از کانالهای کمک کننده بوده است. در حالی که تمامی این تحقیق ها برای افزایش بازده بخاری کارآمد به نظر می رسند، اما به دلایلی کمتر صنعت پسند بوده اند.

بیشترین مقدار اتلاف انرژی برای بخاری های دودکشدار، دودکش آنهاست. از طرفی جهت خارج کردن محصولات احتراق ناگزیر به استفاده از دودکش برای این بخاری ها هستیم. اما می توان با نصب یک کانالِ هوای پر سرعت روی دودکش و تعبیه صفحات فلزی فین و تغییر شکل دودکش بخاری، گرمای مازاد برگرمای لازم، جهت خارج شـــدن گاز های احتراق را به محیط بازگرداند. این کار به طرق مختلفی می تواند صورت بگیرد، به این خاطر ۸ هندسه پیشنهادی بر اساس محدودیت ها و شرایط عملیاتی توسط نرم افزار رسم ۳ بعدی کشیده شد تا پس از شبیه سازی بهترین مدل انتخاب شود. به علاوه بررسی بیشتر نتایج برای بدست آوردن مدلهای با کارایی بیشتر در آینده مفید خواهند بود. اما برای بدست آوردن شروط مرزی و دیگر داده ها، یک مدل اولیه ای بر اساس سادگی ساخت و آزمایش و همچنین ارضای اطلاعات جهت شبیه سازی، طراحی و ساخته شد. پس از آن آزمایشات اولیه برای بدست آوردن شرایط عملیاتی و داده های خروجی (از جمله دماهای ورودی و خروجی دودکش، سرعت گاز درون دودکش و دمای محیط) انجام گرفت. با توجه به پارامترهای مجهولِ متعدد موجود در مسئله(ضریب انتقال حرارت جابجایی دیواره دودکش، ضریب رسانش حرارتی فلز مورد استفاده، ظرفیت حرارتی گاز درون دودکش) برای کم کردن تعداد دفعات شبیه سازی، آزمایشات و شبیه سازی های متناظر شان در دو بخش طراحی و اجرا شدند. در بخش اول دودکش حاوی صفحات فین بدون حضور کانال هوای پر سرعت و با شرط انتقال حرارت جابجایی طبیعی، پس از تحقق استقلال از تعداد مش آزمایش و شبیه سازی شد تا با مقایسه نتایج بدست آمده تمامی پارامتر های مجهول با ضریب انتقال حرارت h تقریبیِ صحیح (h در حالت انتقال حرارت جابجایی طبیعی) بدست آیند. در بخش بعدی، پس از بدست آوردن پارامتر های مجهول با استفاده از روش عددی حل وتریِ تابع، حدس و خطا برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت در دیواره خارجی دودکش (در حضور هوای پر سرعت) با کمترین تعداد تکرار برای دو سرعت انجام شد که این مقادیر با تقریب خوبی بدست آمد. پس از بدست آوردن تمام پارامتر های عملیاتی، تمام هندسه ها در شرایط یکسان برای دو مقدار از ضریب انتقال حرارت بدست آمده(دو سرعت فن) شبیه سازی شدند تا توسط معیار برتری مشخصی، مدل بهتر انتخاب شود. پس از تعیین بهترین مدل ، برای صحت سنجی آزمایش، نمونه منتخب ساخته و آزمایش شد. اختلاف دمای خروجی در دو حالت تجربی و عددی با ۴ درجه کلوین بوده که این تطبیق، موئید حل عددی می باشد. مدل نهایی بازده بخاری گازی دودکشدار را تا ۷۳٪ افزایش داد. همچنین مشخص شد بیشترین تاثیر عوامل مربوط به تعداد پره و کمترین تاثیر مربوط به ضخامت پره ها می باشد. اما با بهبود تمام عوامل به صورت توام اثر تک تک عامل ها بیشتر می شود. از طرفی شکلهای گرافیکی و دیگر نتایج هم برای رساندن این طرح به مدل توسعه یافته تر کمک می کنند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ مقدمه ای در مورد انرژی و آمارهای مصرف گاز ۲

۱-۱-۱ صرفه اقتصادی ۳

۱-۲ سوابق طرح ۳

۱-۳ توضیح فنی نحوه کار بخاری دودکشدار ۴

۱-۴ ضرورت روش عددی ۵

فصل دوم: اصول حل عددی- تاریخچه پژوهش ها و روابط ۷

۲-۱ روشهای عددی ۷

۲-۲ تاریخچه CFD ۷

۲-۳ ریاضیات CFD ۷

۲-۳-۱ روش تفاضل محدود ۹

۲-۳-۲ روش حجم محدود ۹

۲-۳-۳ روش المان محدود ۱۰

۲-۴ تاریخچه روش المان محدود در نرم افزارANSYS ۱۰

۲-۵ روش شناسی CFD ۱۱

فصل سوم: معادلات حاکم برای حل عددی و مدل ها ۱۳

۳-۱معادلات عمومی ۱۳

۳-۲مدل اغتشاشی ۱۴

۳-۲-۱مدل k-ε استاندارد ۱۴

۳-۲-۲مدل k-ε Realizable ۱۶

۳-۲-۳ اثر دیوار ۱۷

۳-۳ استراتژی حل عددی برای این تحقیق ۱۹

۳-۳-۱ مقدمه ۱۹

۳-۳-۲ روش حل ۲۰

۳-۳-۳ روش coupled (توام شده) ۲۰
۳-۳-۴ مدل اغتشاشی ۲۲
۳-۳-۵ گسسته سازی ۲۲
۳-۳-۶ ضرایب زیر تخفیف ۲۳
۳-۳-۷ معیار همگرایی ۲۴
۳-۳-۸ شرایط مرزی ۲۴

فصل چهارم: روش انجام تحقیق ۲۵
۴-۱ محدودیت ها و شرایط فیزیکی ۲۶
۴-۲ تجهیزات و شیوه سنجش داده ها ۲۷
۴-۲-۱ سنجش سرعت ۲۷
۴-۲-۲ سنجش دما ۲۸
۴-۲-۳ محیط آزمایش ۲۸
۴-۲-۴ سنجش شرایط در ورودی های تفکیک شده سیال ۲۹
۴-۲-۵ استحصال ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی برای مدل اولیه ۳۰
۴-۲-۶ تجهیزات ۳۱
۴-۳ آزمایش و شبیه سازی اولیه ۳۳
۴-۳-۱ شرایط عملیاتی ۳۴
۴-۳-۲ شرایط مرزی ۳۵
۴-۳-۳ مدلهای مورد استفاده ۳۶
۴-۳-۴ بررسی استقلال نتایج از تعداد مش ۳۷
۴-۳-۵ بررسی استقلال نتایج از تعداد تکرار ۳۸
۴-۳-۶ پیدا کردن بهترین مقادیر برای برخی پارمتر های مجهول ۳۸
۴-۴ شبیه سازی و حل مدل A در مجاورت هوای پر سرعت اطاف دودکش ۴۳
۴-۴-۱ استفاده از روش حل وتری ۴۳
۴-۵ شبیه سازی و حل مدل های دیگر ۴۵
۴-۵-۱ مشخصات هندسه ها ۴۶
۴-۵-۲ مشخصات مواد مورد استفاده در شبیه سازی ۴۸
۴-۵-۳ مشخصات گسسته سازی حجم و سطح مدلها ۴۹
۴-۵-۴ برخی تنظیمات نرم افزاری ۵۱

فصل پنجم: نتایج و بحث و بررسی ۵۲
۵-۱ نتایج شبیه سازی مدلها ۵۲
۵-۱-۱ مدل A ۵۳
۵-۱-۲ مدل B ۵۶
۵-۱-۲ مدل 'B ۶۰
۵-۱-۲ مدل C ۶۳
۵-۱-۲ مدل 'C ۶۷
۵-۱-۲ مدل D ۷۰
۵-۱-۲ مدل 'D ۷۴
۵-۱-۲ مدل E ۷۷
۵-۱-۲ مدل'E ۸۱
۵-۲ بحث و بررسی ۸۴
۵-۲-۱ بررسی تغییرات دما و فشار در طول دودکش ۸۵
۵-۲-۲ مقایسه فاکتور برتری ۸۷
۵-۲-۳ بررسی اثر مشخصات فیزیکی ۸۷

مراجع ۹۵

فصل اول
مقدمه

باتوجه به نیاز روزافزون بشـــر به انرژی به نظر می رســـد پس از تامین منابع تولید، ایجاد راهکارهایی جهت بهینه ســـازی مصرف آن، در اولویت برنامه های مدیریت انرژی قرار دارد.

۱-۱ مقدمه ای در مورد انرژی و آمارهای مصرف گاز:

[۱]قیمت هر مترمکعب گاز در کش۱ور حدود ۷۰ تومان محاســبه می شــود. این در حالی اســت که در شــرایط فعلی با احتساب ارز، ایران هر متر مکعب گاز خود را به ترکیه با قیمت ۱۵۰۰ تومان صادر می کند. در حال حاضر کشور به چهار اقلیم آب و هوایی تقسیم بندی شده که در اقلیم یک به عنوان سردترین شرایط آب و هوایی اگر مشترکان ماهانه تا سقف ۳۰۰ مترمکعب گاز مصرف کنند، گاز بهای هر مترمکعب گاز مصرفی این دسته از مشترکان با قیمت ۳۰ تومان و چنانچه بیش از ۵۰۰ مترمکعب در ماه مصرف کنند، با قیمت ۷۰ تومان محاسبه می شود.

۱-۱-۱ [۲] مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی در سال ۱۳۹۰به تنهایی بالغ بر ۴۴۰۵۵ میلیون متر مکعب بود که این میزان مصرف درمقایسه با سال قبل علی رغم افزایش قیمت گاز، ۷/۸ در صد ر شد دا شته ا ست. با وجودافزایش قیمت گاز طبیعی پس از اجرای قانون هدفمندی یارانه ها، رشد مصرف این حامل انرژی در بخش خانگی و تجاری متوقف نشده است .در سال۱۳۹۰، این بخش با سهمی معادل۴۲/۶ در صد از کل مصرف نهایی، عمده ترین مصرف کننده

گازطبیعی در بخش مصرف نهایی میباشد. وابستگی زیاد بخش خانگی به گازطبیعی در تأمین انرژی خود، سبب شده که تأمین انرژی این بخش در فصول سرد سال به ویژه در مناطق سردسیر کشور با مشکلات زیادی روبرو گردد.

قیمت گاز در سال ۹۰ برای ۷ ماه اول ۱۲۰۰ و برای ۵ ماه سرد سال ۷۰۰ ریال بر مترمکعب برنامه ریزی شده بود. این درحالیست که مصرف گاز در جهان ۲/۲ در صد رشد داشته است و متوسط قیمت گاز خانگی در کشور های عضو OECD[1] ۶/۸ و برای سوئد و آمریکا که بترتیب بیشترین و کمترین قیمت را دارند، ۲۰ و ۴/۴ سنت است. بررسی شاخص قیمت گاز طبیعی در سال ۲۰۱۱ نشان می دهد که شاخص قیمت اسمی گاز طبیعی در بخش خانگی ۱۹/۲ درصد نسبت به سال ۲۰۰۵ افزایش داشته است. از جمع بندی نکات فوق می توان فهمید که به علت محدود بودن منابع گازی، قیمت این حامل انرژی همواره در حال افزایش است. در صورتی که قیمت جهانی هر کیلووات برق ثابت و بلکه در حال کاهش است[۲].

۱-۱-۲ صرفه اقتصادی سیستم:

یکی از منابع اصلی انرژی در کشور گاز طبیعی است. با توجه به سهم مصارف خانگی از کل مصرف گاز کشور لازم است بهینه سازی به مدیریت مصرف در منازل و مراکز مسکونی نیز هدایت شود. و با ارائه راهکارهای عملی و ایجاد شرایط مناسب، مصرف‌کنندگان کوچک در منازل مسکونی نیز در مسیر بهینه سازی قرار گیرند. در همین راستا لزوم پژوهش درباره وسایل گازسوزی مانند بخاری ها که دارای کارایی پایین و گستردگی استفاده بالایی هستند بیش از پیش محسوس می باشد.

البته ضمن توجه به کم بازده بودن بخاریهای دودکشدار باید اعتراف کرد که این وسایل دارای استهلاک کمی می باشند که در صورت خرابی هم قابل تعمیرند. در این صورت خیلی سخت می توان به از رده خارج شدنشان و جایگزین شدن بخاری های کارآمد تا قبل از ۱۰ سال آینده امیدوار بود. دراین حالت به نظر می رسد بهترین کار طراحی وسیله ای جانبی، برای افزایش راندمان بخاری هاست.

باید توجه داشت که هدف طرح مورد تحقیق افزایش بازده بخاری ها از ۶۳ تا ۷۸ یا ۸۰ درصد است که به این منظور از یک فن با توان ۳۳ وات بهره گرفته شده است. از طرفی در حال حاضر ۱۵ میلیون مصرف کننده بخاری گازی دودکشدار در کشور وجود دارد. در این حالت با یک حساب سر انگشتی می توان به راحتی صرفه سیستم را ادعا کرد.

[1] Organizaton to Economic Cooperation and Development

۱-۲ سوابق طرح

در بحث بازیابی انرژی دودکشها(و دیگر دافع های محصولات احتراق) تحقیقات مختلف از طرق مختلفی صورت گفته ا ست. یکی از رو شها ا ستفاده از فن برای ایجاد هوای همرفتی در تماس با یخاری گازی دودکشدار ا ست. در این زمینه تحقیقات کمی صورت گرفته است. به عنوان مثال در مقاله آقای کیانی فر و دیگران [۳] اثر پارامترهایی همچون شرایط محیط، ارتفاع و قطر دودکش، سهم انتقال حرارت تشعشعی و نصب فن روی بخاری بر افزایش راندمان بررسی شده است.همچنین دراین مقاله ادعا شده که با افزایش سهم انتقال حرارت تشعشعی یا استفاده از فن می توان راندمان بخاری را تا ۸۵٪ افزایش داد. در این مقاله یک فن به سیستم بخاری اضافه شده است. استفاده از فن به این شکل طبیعتا فواید و معایب خود را دارد. در جایی دیگر آقای صادق زاده [۴] طی تحقیقی با استفاده از یک مبدل صفحه ای اقدام به سرد کردن گاز درون دودکش کرده است. در این مقاله با توجه به شکل و اندازه مبدل انتقال حرارت احتمالا اهداف علمی طرح بیشتر مد نظر این محقق بوده است.

یکی دیگر از این شیوه ها استفاده از لوله های گرمایی است. از جمله تحقیقات موجود در اینباره بررسی تاثیر پارامتر های هندسی بر بازده مبدل لوله گرمایی، شامل تعداد ردیف لوله های در جریان، سطح لوله ها و تعداد پره های در واحد طول به صورت منفرد،[۵] ، بکارگیری انواع لوله گرمایی با ابعاد و نسبت حجم سیال عامل گوناگون، [۶] ، محاسبه محل بهینه صفحه جداکننده قسمت های اواپراتور و کندانسور برای کسب بیشترین شار حرارتی.انتقالی بر حسب نرخ های حجمی عبوری مختلف از آنها، می باشد[۷].

چندین تحقیق نیز در مورد بکارگیری مبدل های لوله گرمایی برای بازیابی حرارت اتلافی در سیستم های تهویه مطبوع انجام شده است.

نوعی و مجیدیان[۸] یک مبدل لوله گرمایی ساده را به منظور بازیابی حرارت هوای خروجی از یک محیط که تمام هوای داخل می بایست بصورت مکرر تعویض شود، مانند اتاق عمل بیمارستان، طراحی نموده و ساختند. سه سیال عامل آب، متانول و استون در نظر گرفته شدند. نتایج نشان دادند که شار حرارتی محدود کننده در لوله گرمایی به اندازه کافی بالاتر از شار مورد نیاز در دما های کاری تهویه می باشد. به این ترتیب لوله مناسب با سیال کاری متانول انتخاب شد و رفتار شار بازیابی شده با تغییر دمای هوای داخل تعیین گردید.

عبدالباقی و محمِد[۹] یک مبدل لوله گرمایی را برای حالت سرمایش تابستانی که در آن از سرمای هوای خروجی از محیط، برای پیش سرمایش هوای تازه و گرم ورودی به سیستم تهویه استفاده می شد، طراحی و ساختند. نرخهای مختلف جریان های هوای خروجی و ورودی و دماهای مختلف هوای محیط بیرون، برای یافتن بازده و رفتار مبدل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان دادند که تاثیر نسبت نرخ های جریان در سمت اواپراتور مبدل مثبت و در سمت کندانسور منفی است و همچنین بازده مبدل به مقدار بهینه اقتصادی محاسبه شده نزدیک است.

سویلمز[۱۰] محاسبات ترمودینامیکی- اقتصادی یک مبدل لوله گرمایی بازیاب حرارت را انجام داد و مقدار ضریب تاثیر بهینه آن را برای رسیدن به بهترین حالت اقتصادی با کمک روش ε-NTU محاسبه نمود، که از آن می توان در تعیین بازده گرمایی مبدل در نقطه بهینه اقتصادی، استفاده کرد.

در این مقاله، بازیابی حرارت توسط مبدل لوله گرمایی و تاثیر آن در شرایط کارکرد سیستم های معمول تهویه، به همراه محاسبه اقتصادی و قابلیت بازگشت سرمایه در شرایط مختلف کاری، مدل سازی شده است.

۱-۳ توضیح فنی نحوه کار بخاری دودکشدار

دودکش های بخاری برای خارج کردن محصولات احتراق(CO, CO_2, H_2O) به کار میروند این وسیله با استفاده از کاهش یافتن جرم حجمی گاز های داغ می تواند در خود مکش ایجاد کند و گاز های سمی را از محفظه ی احتراق به بیرون هدایت کند. پس وجود گرما درگاز های خروجی امری ناگزیر است. اما به علت بیشتر بودن گرمای گازهای خروجی از مقدارگرمای لازم برای مکش، این عمل همراه با هدر رفتن انرژی همراه است.

همزمان با شروع به کار بخاری جرم حجمی هوای اطراف بخاری بر اثر گرفتن حرارت کم می شود و باعث ایجاد نیروی شناوری در راستای ارتفاع بخاری می شود و از این طریق جابجایی آزاد صورت می گیرد. در این حالت به علت نیروی شناوری ضعیف و تماس هوای کمتر در واحد زمان انتقال حرارت با مکانیزم تشعشعی سهم عمده ای را به خود اختصاص خواهد داد. تحقیقا بررسی شد که برای گرفتن گرمای اضافه ی دودکش می توان حجم هوای اطراف دودکش در واحد زمان را افزایش داد. با این کار علاوه بر برآورده کردن نیاز های پروژه می توان به طور موثر باعث گردش مطلوب و مساعد هوای اطراف بخاری گردید. به گونه ای که از این طریق نیز باعث افزایش بازده انتقال حرارت مطلوب به اتاق گردید.

۱-٤ ضرورت روش عددی

شاید در نگاه اول، مدلسازی ساده با فرضیات عام و تعمیم معادلات برای تمام مسائل انتقال حرارت و انتقال مومنتم راحت تر و منطقی تر به نظر برسد. اما باید دقت داشت که تمام شرایط و فرضیات ایده آل موجود در مدلسازی برای یک مسئله به صورت خاص مهیا نیستند و نتایج یک مدلسازی در مسائل خاص بیشتر به صورت کیفی مورد توجه قرار می گیرند.

اما برای حل کامل یک مسئله به صورت خاص(شرایط عملیاتی خاص، هندسه خاص) چه در حالت گذار چه در حالت پایدار استفاده از حل عددی اجتناب ناپذیر است.

۱-۵ مسئله

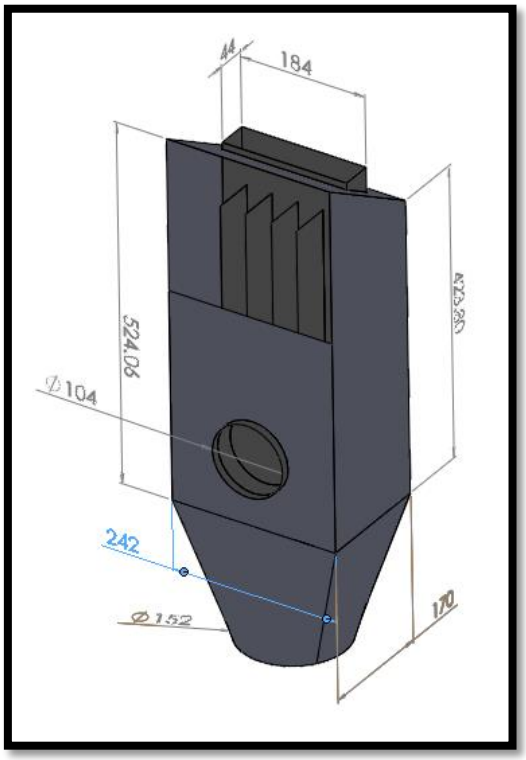
در این تحقیق چگونگی بازیافت انرژی دودکش بخاری(اصلی ترین مکان اتلاف انرژی در بخاری) با استفاده ازجابجایی اجباری هوا بررسی شده است. هدف پیدا کردن بهترین راه برای جلوگیری از هدر رفتن انرژی در دودکش بخاری و افزایش بازده انتقال حرارت به محیط اطراف به ازای افت فشار کم در داخل دودکش می باشد.

طی مشاهدات انجام شده در طول آزمایش ها و سنجش موارد عدم کارایی بالای بخاری ها، برای افزایش بازده بخاری دودکش دار(کاهش دمای گاز درون دودکش) از مکانیزم انتقال حرارت جابجایی اجباری روی دودکش، استفاده شد.

این کار علاوه بر افزایش بازده باعث افزایش دمای تعادلی اتاق در ظرفیت های ثابتی از بخاری می گردد. به عبارتی به علت کاهش مقاومت حرارتی بین صفحات گرم بخاری و متوسط دمای اتاق، کاربر دمای بالاتری را نسبت به حالت قبل احساس می کند و ظرفیت های کمتری را نسبت به حالت قبل برای شعله بخاری انتخاب می کند و از این جهت هم شاهد مصرف کمتر به ازای دمای ثابت اتاق خواهیم بود.

برای این منظور مکان های مختلفی را می توان برای تعبیه فن یا بلوئر انتخاب کرد. اما با توجه به تاکید بر قابلیت نصب این سیستم بر روی تمامی مدل های بخاری دودکش دار(در حال استفاده یا در مرحله طراحی و تولید)، دودکش بخاری به عنوان بهترین مکان تشخیص داده شد. بر اساس سادگی، کوچک بودن، کم بودن افت فشار و تطبیق با شرایط انواع بخاری ها در شرایط ساختمان های مختلف، محیط عملیات برای ایجاد هندسه های مختلف در دودکش، کانالی با طول و عرض ۱۷ و ۲۴ سانتیمتر و با ارتفاع متوسط ۴۰ سانتیمتر از مرکز لوله خروجی از بخاری در نظر گرفته شد.

در حالی که فن در پایین ترین حالت کانال هوای پر سرعت، قرار گرفت تا کمترین تاثیر را از دمای بالای هوای محیط اطراف بخاری داشته باشد.



شکل ۱-۵ نمایش ابعاد طرح(اندازه ها به میلیمتر می باشند)

فصل دوم
اصول حل عددی، تاریخچه پژوهش ها و روابط

۲-۱ روش های عددی

مسایل مهندسی بسیاری وجود دارد که حل تحلیلی و دقیق آن ها ممکن نیست. این ناتوانی در تعیین حل دقیق، هم ممکن است ناشی از طبیعت پیچیده حاکم بر معادلات دیفرانسیل بوده و هم امکان دارد از پیچیدگی های مربوط به اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی نشات گرفته باشد. برای بررسی این گونه مسایل، روش های حل تقریبی عددی به کار گرفته شده اند. برخلاف حل های تحلیلی که رفتار دقیق سیستم را در هز نقطه تعیین می کنند، حل های تقریبی، تحلیل دقیق خود را فقط در تعدادی نقاط مخصوص تعیین می نمایند که این نقاط گره نامیده می شوند. اول قدم در انجام یک حل تقریبی عددی، گسسته نمودن مدل می باشد. این فرایند، مدل مورد بررسی را به گره ها و نواحی کوچکتر تبدیل می کند. روش های عددی به دو دسته ی کلی تقسیم می شوند:

۱- روش های تفاضل متناهی

۲- روش های المان محدود

با روش های تفاضل متناهی، معادلات دیفرانسیل برای هریک از گره ها نوشته شده و مشتق ها با معادلات تفاضلی جابه جا می شوند. نتیجه این عمل یک سری معادلات خطی متقارن استو هم چنین روش تفاضل متناهی از لحاظ فهم و آموزش ساده بوده و می تواند برای حل مسایل ساده به کار گرفته شود. البته این روش برای حل مسایلی که دارای هندسه ی پیچیده و یا شرایط مرزی خاصی باشند، دشوار خواهد شد. این شرایط دشوار در حالتی که رفتار خواص ماده ایزوتروپیک نباشد هم پیش خواهد آمد.

در مقابل، روش المان محدود برای ساخت یک سیستم معادلات جبری، از معادلات انتگرالی به جای معادلات دیفرانسیلی استفاده می کند. به علاوه، یک تابع تقریبی پیوسته برای بیان تحلیل در هر المان فرض می شود و سپس حل کامل با اتصال و با مونتاژ حل های هر المان با استفاده از شرایط مرزی موجود در آن المان، بدست می آید.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یک ابزار مبتنی بر محاسبات کامپیوتری جهت شبیه سازی رفتار سیستم هایی شامل جریان سیال، انتقال حرارت و سایر فرایندهای فیزیکی وابسته است. این ابزار با حل معادلات جریان سیال (در یک فرم خاص) بر روی یک ناحیه مورد نظر، با اعمال شرایط مرزی مشخص، جریان سیال را پیش بینی می کند.

۲-۲ تاریخچه CFD

سالهای زیادی است که از کامپیوتر برای حل مسایل جریان سیال استفاده می شود و برنامه های بسیاری به منظور حل مسایل مختلف نوشته شده است. از اواسط سال ۱۹۷۰، ریاضیات پیچیده مورد نیاز برای تعمیم این الگوریتم ها شروع به رشد کرد و حل گرهای همه کاره CFD توسعه یافتند.این حل گرها در اوایل دهه ۱۹۸۰ شروع به ظاهر شدن کردند و چیزی که نیاز داشتند، کامپیوترهای قدرتمند، درک عمیقی از دینامیک سیالات و همچنین زمان بسیار زیاد برای برپایی شبیه سازی بود. در نتیجه، تقریبا می توان گفت که از ابزار CFD منحصرا در امور تحقیقاتی بسیار ضروری استفاده میشد.

پیشرفت های اخیر در قدرت کامپیوتر، به همراه گرافیک قدرتمند و به کارگیری مدل های سه بعدی، فرایند تهیه یک مدل CFD و تحلیل نتایج را آسان تر کرده و زمان مورد نیاز و بنابراین هزینه شبیه سازی را به شدت کاهش داده است. حل گرهای پیشرفته، دارای الگوریتم هایی می باشند که حل نیرومند میدان جریان را در زمان مناسب فراهم می آورند. در نتیجه ابزار CFD، یک جایگزین نسبتا دقیق و مقرون به صرفه برای آزمایش های تجربی مدل های مقیاس شده آزمایشگاهی می باشد که از مزایای کاملا روشن آن این است که تغییرات مورد نیاز را می توان سریعا به شبیه سازی اعمال کرد.

۲-۳ ریاضیات CFD

معادلات مکانیک سیالات که بیش از یک قرن پیش ساخته شدند، تنها برای حل تعداد محدودی از مسایل جریان به شیوه تحلیلی قابل استفاده هستند. این راه حل های شناخته شده برای درک جریان سیال فوق العاده مفیدند اما به ندرت می توان از آن ها به طور مستقیم در تجزیه و تحلیل و یا طراحی های مهندسی استفاده کرد. از این رو در تحلیل های مهندسی رویکردهای دیگری مورد استفاده قرار می گیرد.

مجموعه ای از معادلات که فرایندهای انتقال جرم و اندازه حرکت را توصیف می کنند، به عنوان معادلات ناویر-استوکس شناخته می شوند. این معادلات دیفرانسیل جزیی، در اوایل قرن نوزدهم استخراج شدند و هیچ گونه حل تحلیلی بسته شناخته شده ای ندارند اما می توان آن ها را گسسته سازی و به صورت عددی حل کرد.

چگونگی گسسته سازی معادلات به وسیله شبکه عددی تعیین می شود که اساسا نمایش گسسته ای از حوزه هندسی است که مساله می بایست بر روی آن حل شود. در واقع شبکه، حوزه حل را به تعداد محدودی زیردامنه (المان ها و حجم های کنترل) تقسیم می کند.

روش های حل متفاوتی در کدهای CFD مورد استفاده قرار می گیرند. عموما رویکردهای گسسته سازی معادلات جهت حل عددی مسایل دینامیک سیالات محاسباتی به سه گروه تقسیم می شوند:

۲-۳-۱ روش تفاضل محدود

این روش قدیمی ترین رویکرد حل عددی معادلات جزیی می باشد و اعتقاد بر این است که اولین بار توسط Euler در قرن هجدهم معرفی شده است. همچنین این رویکرد آسان ترین روش برای استفاده در حل مسایلی با هندسه های ساده است.

نقطه شروع، استفاده از معادلات بقا به فرم دیفرانسیلی است. حوزه حل به وسیله یک شبکه پوشش داده می شود. در هر نقطه از شبکه، معادلات دیفرانسیل به کمک سری تیلور و تبدیل مشتقات به ضرایبی از مقادیر موجود در نقاط اطراف، تقریب زده می شود. هم چنین هروقت لازم باشد می توان برای بدست آوردن مقدار متغیرها در مکان هایی غیر از گره های شبکه از روش درون یابی استفاده کرد. نتیجه حاصل، یک معادله جبری در هر گره از شبکه است که در آن مقدار متغیر در گره مورد نظر و تعداد مشخصی از گره های مجاور آن به عنوان مقادیر مجهول ظاهر می شوند.

در کل، روش تفاضل محدود در شبکه های سازمان یافته بکار گرفته میشود. در شبکه های سازمان یافته، این روش خیلی ساده و موثر است. خصوصا اینکه دستیابی به طرح هایی با مراتب بالاتر بر روی شبکه های منظم خیلی آسانتر است. اما یکی از معایب روش تفاضل محدود این است که از ضای قوانین بقا به آسانی رخ نمیدهد. همچنین محدود بودن کاربرد آن برای هندسه های ساده نیز در هنگام شبیه سازی جریان های پیچیده، یکی دیگر از معایب عمده این روش می باشد.

۲-۳-۲ روش حجم محدود

روش حجم محدود از فرم انتگرالی معدلات بقا به عنوان نقطه شروع استفاده می کند. در این رویکرد، حوزه حل به تعداد محدودی از حجم های کنترل هم مرز تقسیم می شود و معادلات بقا به صورت انتگرالی به هر حجم کنترل اعمال می شود. در مرکز هندسی هر حجم کنترل، یک گره محاسباتی قرار دارد که مقدار متغیرهای جریان باید در آن نقطه محاسبه شود. در صورت لزوم از روش درون یابی برای بیان مقادیر متغیرها در سطوح حجم کنترل بر اساس مقادیر گره محاسباتی مرکزی استفاده می شود.انتگرال های سطحی و حجمی با استفاده از فرمول های عددی مناسب تقریب زده می شوند. در نتیجه، می توان یک معادله جبری برای هر حجم کنترل بدست آورد که از حل آنها تصویر کاملی از رفتار جریان بدست خواهد آمد.

روش حجم محدود می تواند با هر نوع شبکه ای سازگار با شد و از این رو برای هند سه های پیچیده منا سب ا ست. این رویکرد شـاید سـاده ترین روش برای درک و برنامه نویسـی باشـد و از این رو برای درک و برنامه نویسـی باشـد. تمام جملاتی که باید تقریب زده شـوند مفهومی فیزیکی دارند و به همین دلیل، این روش به عنوان یکی از رایج ترین تکنیک های گسسته سازی در سیالات به شمار می رود. اشکال روش حجم محدود در مقایسه با روش تفاضل محدود این است که تقریب های مرتبه بالاتر از دو را به سـختی می توان در هندسـه های سـه بعدی گسـترش داد. این موضـوع بدین دلیل است که رویکرد حجم محدود نیاز به سه سطح از تقریب دارد که عبارتند از: درون یابی، مشتق گیری و انتگرال گیری.

۲-۳-۳ روش المان محدود

روش المان محدود در خیلی از موارد شبیه به روش حجم محدود است. حوزه مورد نظر به تعدادی از حجم های گسسته یا المان های محدود تقسیم می شود که عموما غیر سازمان یافته هستند.در مسایل دو بعدی المان ها معمولا به شکل مثلث و یا چهار ضلعی هستند. در حالی که در مسایل سه بعدی معمولا از المان های چهاروجهی و یا شش وجهی استفاده می شود. ویژگی متمایز روش المان محدود نسبت به سایر روش ها این است که معادلات قبل از انتگرال گیری بر روی حوزه مورد نظر، در یک تابع وزن ضرب می شوند. در ساده ترین روش المان محدود، حل مساله در هز المان به وسیله یک تابع شکل خطی که پیوستگی متغیرها روی مرزهای مشترک المان ها را ارضا می کند، تقریب زده می شود. چنین تابع شکلی می تواند با استفاده از مقادیر آن در گوشه های المان ساخته شود. تابع وزن معمولا فرم مشابهی با تابع شکل دارد.

این تقریب سپس درون انتگرال وزنی قانون بقا جایگزین می شود و معادلاتی که باید حل شوند با مساوی صفر قرار دادن مشـتق انتگرال نسـبت به مقادیر گره ای بدسـت می آید. این فرایند متناظر اسـت با انتخاب بهترین جواب از بین مجموعه توابع مجاز (جوابی که کمترین باقیمانده را دارد). در نتیجه یک دسته از معادلات جبری غیرخطی بدست خواهد آمد.

یک مزیت مهم روش المان محدود، توانایی تطابق آن با هندسـه های دلخواه اسـت. در این روش شـبکه ها به آسـانی تصحیح می شوند و هر المان به سادگی به بخش های کوچکتر تقسیم می شود. روش المان محدود از نظر تجزیه و تحلیل ریا ضی نسبتا آ سان ا ست. ا شکال ا سا سی هر رو شی که از شبکه های غیر سازمان یافته ا ستفاده می کند این ا ست که ماتریس های معادلات خطی شده به خوبی آنچه که برای شبکه های منظم هستند ساخته نمی شوند و از این رو پیدا کردن روش های حل مناسب را برای آن ها مشکل تر می کند.

در نرم افزار Asys CFX از یک روش ترکیبی که روش حجم محدود مبتنی بر المان نامیده می شـود، اسـتفاده می گردد. در این روش از توابع شـکل برای توصـیف تغییر متغیرها روی یک المان اسـتفاده می شـود. حجم های کنترلی اطراف هر گره به وسیله اتصال مراکز هندسی المان ها تشکیل می گردد. همانند روش حجم محدود، معادلات بقا به فرم انتگرالی به این حجم های کنترل اعمال می شود. همچنین شارهای عبوری از مرزهای حجم کنترل و جملات منبع نیز بر اساس المان حساب می شوند.

۲-٤ تاریخچه روش المان محدود و نرم افزار ANSYS

روش المان محدود یک روش عددی است که می تواند برای حل بسیاری از مسایل مهندسی به کار گرفته شود. حالت های پیوسته، گذرا، خطی و غیرخطی از مسایل تحلیل تنش، انتقال حرارت، جریان سیال و الکترو مغناطیس می توانند به کمک روش المان محدود بررسی و تحلیل گردند. مبدا و منشا روش المان محدود امروزی، به قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی برمی گردد. وقتی که تعدادی محقق یک جسم الاستیک پیوسته را با چندین میله الاستیک جدا از هم مدل سازی نموده و تقریب زدند. در هر حال، Courant(1943) به عنوان اولین کسی شناخته می شود که روش المان محدود را ایجاد نموده و توسعه داده است. در مقالاتی که در اوایل دهه ۱۹۴۰ منتشر شده است، Courant از چند جمله ای های تکه ای میان یاب در نواحی مثلثی برای تحلیل مسایل پیچش استفاده نموده است. مرحله چشمگیر دیگر در استفاده از روش المان محدود که به وسیله Boeing در دهه ۱۹۵۰ اتفاق افتاده و سپس توسط دیگران ادامه داده شده است، استفاده از المان های تنشی مثلثی برای مدل سازی بال هواپیما بوده است. در دهه ۱۹۶۰، Clough واژه «المان محدود» را عمومی و رایج نمود. در طول دهه ۱۹۶۰، محققان شروع به بکار گیری روش المان محدود در دیگر سطوح مهندسی کردند، در آن زمان مسایل انتقال حرارت و نفوذ جریان سیال مورد توجه قرار گرفت. و بلاخره Zienkiewicz و Cheung در سال ۱۹۶۷ اولین کتابی که به طور کامل به روش المان محدود پرداخته بود را به چاپ رساندند[۱۱].

۲-۵ روش شناسی CFD

فرایند انجام یک شبیه سازی CFD به چهار مرحله تقسیم می شود:

۱- ایجاد هندسه/ شبکه

این فرایند، اولین مرحله پیش پردازش می باشد. هدف ایجاد یک شبکه برای ورود به پیش پردازنده است. قبل از ایجاد شبکه، یک هندسه بسته مورد نیاز است. هندسه و شبکه را می توان به کمک ابزار های مختلف تولید کرد. مراحل اصلی عبارتند از:

۱-۱- تعریف هندسه ناحیه مورد نظر

۱-۲- ایجاد نواحی جریان سیال، نواحی جسم جامد و نامگذاری سطوح مرزی

۱-۳- تنظیم خصوصیات شبکه

۲- تعریف فیزیک مدل

این فرایند، دومین مرحله پیش پردازش است و به منظور ایجاد ورودی مورد نیاز حل گر استفاده می شود. در این مرحله شبکه ایجاد شده بارگذاری می شود و مدل های فیزیکی که باید در شبیه سازی مد نظر قرار گیرند، انتخب می شوند. خصوصیات سیال و شرایط مرزی در این مرحله مشخص می شوند. به عبارت دیگر کل شرایط مساله در این مرحله تعریف می گردد.

۳- حل مساله

مولفه ای که وظیفه حل مساله CFD را بر عهده دارد، حل گر نامیده می شود. در این مرحله، نتایج مورد نیاز تحلیل بدست خواهند آمد. یک مساله CFD به ترتیب زیر حل می شود:

۳-۱- معادلات دیفرانسیل جزیی بر روی تمام حجم های کنترل در ناحیه مورد نظر انتگرال گیری می شوند. این فرایند معادل است با اعمال یک قانون بقای پایه (برای مثال برای جرم یا اندازه حرکت) به هر حجم کنترل.

۳-۲- معادلات انتگرالی به کمک ایجاد یک مجموعه از تقریب ها برای جملات مختلف، به یک دستگاه معادله جبری تبدیل می شوند.

۳-۳- معادلات جبری در تکرارهای متوالی حل می شوند.

به سبب طبیعت غیرخطی معادلات، عموما یک رویکرد تکرار شونده مورد نیاز است و همان طور که جواب ها به سمت جواب مشخصی پیش می روند، اصطلاحا گفته می شود که جواب در حال همگرا شدن است. همچنین در هر تکرار، یک خطا یا باقیمانده، به عنوان معیاری از همگرایی مساله، گزارش داده می شود. اینکه چقدر جوابهای حاصل به جواب دقیق نزدیک است به عواملی بستگی دارد که شامل اندازه و شکل حجم های کنترل و اندازه باقیمانده های نرمال و صحت تعریف مساله و مدل های مورد استفاده در حل می با شد. فرایند های فیزیکی پیچیده نظیر احتراق و توربولانس، غالبا به کمک روابط تجربی مدل می شوند. حل گر درنهایت نتیجه حل را به صورت مقادیر متغیرهای مختلف در نقاط شبکه حاصل به مرحله پس پردازش ارسال می کند.

۴- نمایش نتایج در پس پردازنده

پس پردازنده بخشی است که برای تحلیل و نمایش نتایج از آن استفاده می شود. فرایند پس پردازش شامل هرچیزی از قبیل بدست آوردن مقادیر نقطه ای متغیرها و ایجاد انیمیشن های پیشرفته می باشد.

می توان نتیجه گرفت که تحلیل های CFD، آزمایش ها و تجربیات را از طریق کم کردن حجم کلی کار و نیز کاهش هزینه اضافی، تکمیل می کند.