

فصل اول

مقدمه و ساختار پایان نامه

کوره‌های استوانه‌ای در سیستم‌های گرمایش مدارس، بیمارستان‌ها، مراکز صنعتی، منازل مسکونی و ... در سراسر جهان کاربرد وسیعی دارند. به همین دلیل افزایش بازده و کاهش هزینه‌های اقتصادی کوره‌های استوانه‌ای از اهداف طراحی آن‌ها می‌باشد.

رشد روزافزون استفاده از انرژی و تقاضاهای اقتصادی و محیطی، استفاده کارا از منابع انرژی طبیعی را فرا می‌خواند. تعریف قراردادی کارایی احتراق، هیچ توجهی به کیفیت انرژی گرمایی از مشعل که در محصولات احتراق است، ندارد.

بنابراین معیار مهم ترمودینامیکی در اندازه‌گیری هزینه کلی انرژی هر فرایند، تحلیل ترکیبی انرژی و انرژی ناشی از بازگشت ناپذیری‌های فرایند است. بسیاری از تحقیق‌ها، نقش تحلیل انرژی را برای برآورد سیستم‌های ترمودینامیکی نشان می‌دهد، بر این اساس تحلیل بر اساس انرژی اغلب منجر به عدم موفقیت در تعیین انحراف از حالت ایده آل می‌شود. در یک فرایند ایده آل برگشت پذیر اتلاف انرژی نیست ولی در فرایندهای واقعی بازگشت ناپذیری‌ها، باعث اتلاف انرژی می‌شوند. تعدادی از مطالعات در فرایند احتراق نشان دهنده وجود بازگشت ناپذیری‌های ذاتی ترمودینامیکی هستند که باعث اتلاف انرژی می‌شوند. بررسی سیستم‌های احتراق نشان می‌دهد که حدود یک سوم انرژی سوخت به شکل غیر قابل بازگشت پذیر در مشعل درمی‌آید.

انتشار آلودگی اکسید نیتروژن^۱ از بعضی تجهیزات صنعتی مانند کوره‌های صنعتی، کوره توربین‌های گاز و بسیاری از تجهیزات دیگر تقریباً بالاست، و این آلودگی تاثیر مهمی روی محیط زیست دارد. بنابراین کنترل و کاهش آلاینده اکسید نیتروژن از احتراق سوخت‌های گازی بایستی مد نظر قرار گیرد.

دینامیک سیالات محاسباتی^۲ به عنوان یک تکنیک از سال ۱۹۶۰ برای پیش بینی مسئله احتراق به کار گرفته شده است و معادله‌های فیزیکی با تکنیک‌های عددی ترکیب شدند. مدل‌های احتراقی در یک محفظه احتراق بر اساس حل معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و معادلات انتقال گونه‌ها بوده که با مدل‌های توربولانسی مانند $k-\epsilon$ کوپل می‌شوند. برای مدل کردن احتراق در فاز گازی، می‌توان با فرض واکنش‌های شیمیایی سریع، به حل سریع معادلات دست یافت. این مدل‌ها برای شبیه سازی انواع سیستم‌های احتراقی به کار می‌روند. بنابراین در این پایان نامه با استفاده از این تکنیک‌ها و معادلات ترمودینامیکی به بررسی پارامترهای موثر بر احتراق و تاثیر این پارامترها بر قوانین اول و دوم ترمودینامیک پرداخته می‌شود.

۱-۱- ساختار کلی پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، پس از مروری بر پژوهش‌های گذشته، در فصل سوم به بررسی مضرات آلاینده اکسید نیتروژن و روش‌های کنترل و کاهش انتشار آن از تجهیزات صنعتی پرداخته می‌شود. در فصل چهارم به بررسی معادلات حاکم بر جریان سیال و فرآیند احتراق و معادلات حاکم بر تولید آلاینده‌ها و همچنین معادلات ترمودینامیکی احتراق پرداخته می‌شود. در فصل پنجم نحوه مدل‌سازی انجام شده بر کوره مورد مطالعه قرار گرفته و روش‌های انجام کار و انتخاب مدل‌های مناسب جهت مدل‌سازی احتراق، بررسی می‌شود. در فصل ششم به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی احتراق متان در کوره استوانه‌ای و مقایسه آن با مقادیر عددی و تجربی پرداخته می‌شود، همچنین به تاثیر تغییرات هندسی و مدل مورد استفاده و پارامترهای مختلف نظیر سرعت و دمای هوای ورودی بر قوانین اول و دوم ترمودینامیک و تولید آلاینده اکسید نیتروژن پرداخته می‌شود. در فصل هفتم نتایج حاصل از احتراق هیدروژن در کوره استوانه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی تمامی مراحل بالا، از کد نرم‌افزاری فلوئنت^۳ ۶/۳ که به کمک دینامیک سیالات

^۱ .NO_x

^۲ CFD

^۳ FLUENT 6.3

محاسباتی به مدل‌سازی میدان جریان در داخل محفظه احتراق می‌پردازد، استفاده شده است. نهایتاً در فصل هشتم نتیجه‌گیری کلی و ارائه پیشنهاداتی برای کارهای آتی آورده شده است.

فصل دوم

کلیات و مروری بر کارهای انجام یافته

این فصل از چند قسمت کلی تشکیل شده است در قسمت اول به بررسی کلی انواع کوره‌ها، مدل سازی احتراق، قانون اول ترمودینامیک، آنتروپی، قانون دوم ترمودینامیک و آگزرژی پرداخته شده است. در قسمت بعد انواع شعله‌ها و کارهای صورت گرفته در این زمینه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته می‌شود.

۲-۱- تقسیم بندی کوره‌ها

کوره‌ها به چهار دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند:

- کوره‌های استوانه‌ای^۱
- کوره‌های احتراق دیواره‌ای^۲
- کوره‌های احتراق مماسی^۳
- کوره‌های بستر سیالی^۴

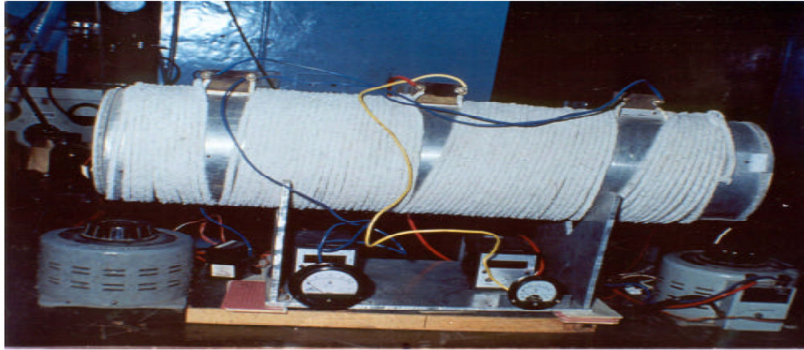
نمونه‌هایی از انواع کوره‌ها در شکل‌های ۲-۱ و ۲-۲ و ۳-۲ و ۴-۲ آورده شده است.

¹ Furnaces Cylindrical

² Wall-Fired Furnaces

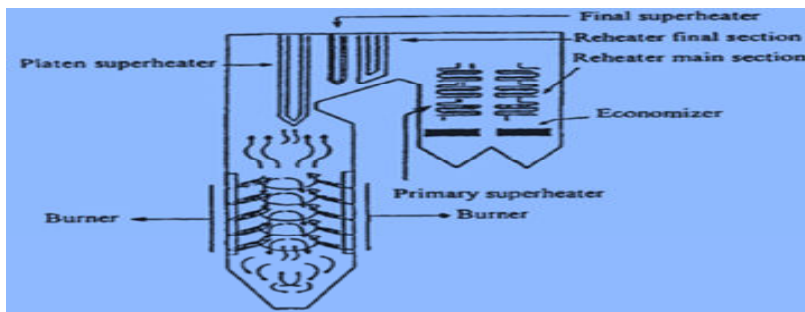
³ Furnaces Tangentially-Fired

⁴ Furnaces Fluidized-Bed

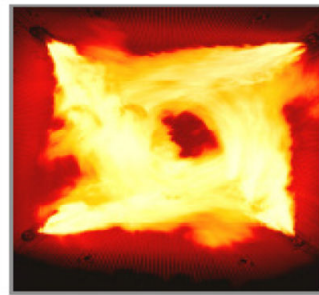
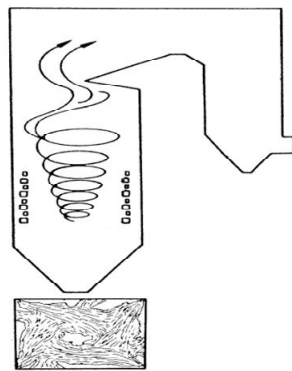


Photograph of cylindrical furnace for absorption control studies

شکل ۲- ۱: نمونه‌ای از کوره استوانه‌ای

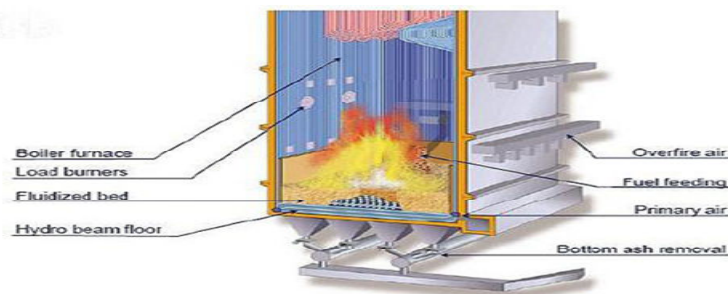


شکل ۲- ۲: نمونه‌ای از کوره احتراق دیواره‌ای



Corner furnace

شکل ۲- ۳: نمونه‌ای از کوره احتراق مماسی



A sketch of a BFB furnace

شکل ۲ - ۴: نمونه‌ای از کوره بستر سیالی

احتراق و جریان‌های واکنشی در بسیاری از وسایل مهندسی مانند کوره‌ها، موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گاز، موشک‌ها و وسایل خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهندسان احتراق همواره در جهت به‌کارگیری کارآمدتر و اقتصادی‌تر منابع انرژی تلاش نموده‌اند. احتراق کارآمد سوخت و انتقال کارآمد گرما در کوره‌ها برای عملکرد اقتصادی این سیستم‌ها ضروری است [۱-۴].

۲-۲- مدل‌سازی احتراق

احتراق و جریان‌های واکنشی در بسیاری از وسایل مهندسی مانند کوره‌ها، موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گاز، موشک‌ها و وسایل خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه طراحی وسایل با احتراق تمیز و بدون آلاینده و همچنین با بازده بالا از اهداف پژوهشگران و طراحان سیستم‌های احتراقی می‌باشد. استفاده از روش‌های پیشرفته محاسباتی و مدل‌سازی دقیق رفتار جریان‌های احتراقی می‌تواند به عنوان یک ابزار مهم مورد استفاده قرار گیرد.

در شبیه‌سازی دقیق جریان‌های احتراقی، مدل احتراق نقش اساسی دارد. زیرا، علاوه بر تعیین مقدار گونه‌ها و محصولات احتراق، آهنگ آزاد شدن انرژی حاصل از ترکیب سوخت و اکسیدکننده را نیز تعیین می‌کند. آهنگ آزاد شدن انرژی در اثر پیشرفت واکنش‌های احتراقی بر مقدار و توزیع دما در نقاط مختلف موثر است و دمای هر نقطه بر رفتار جریان از جمله مؤلفه‌های سرعت، فشار و مشخصات سیال در آن نقطه موثر است. سرعت پیشرفت واکنش‌های شیمیایی و آزاد شدن گرما به سرعت ترکیب سوخت و اکسیدکننده بستگی دارد و آهنگ ترکیب سوخت و اکسیدکننده تابع عوامل مختلف از جمله چگونگی اختلاط سوخت و هوا، غلظت واکنش

دهنده‌ها، دمای محفظه احتراق و غیره می‌باشد. یک مدل احتراق مناسب لازم است تا اثر تمام این عوامل را منظور نماید.

به طور کلی دو وظیفه مهم مدل‌های احتراق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- تعیین تغییرات شیمیایی در مواد شرکت کننده در احتراق

۲- تعیین سرعت رخ دادن تغییرات شیمیایی مذکور و آزاد شدن انرژی

مدل‌سازی احتراق به منظور هدف‌های متعددی صورت می‌گیرد. با مدل‌سازی فرایندهای احتراقی می‌توان به شبیه‌سازی فرایندهای احتراقی پرداخت که در نتیجه آن رفتارهای احتراقی در شرایط مختلف قابل پیش‌بینی خواهد بود. همچنین می‌توان پدیده‌های مختلفی که در حین فرایند احتراق رخ می‌دهند را تبیین نمود. مزیت مدل‌سازی احتراق آن است که می‌تواند جایگزینی برای آزمایش‌های گران و پرهزینه گردد و یا راهنمای مناسبی برای طراحی دستگاه‌های آزمایشگاهی باشد. همچنین با مدل‌سازی می‌توان تاثیر پارامترهای مختلف در احتراق را مورد بررسی قرار داد [۵].

دسته بندی مسائل احتراقی مبتنی بر شرایط مختلفی است که در یک فرایند با آن مواجه هستیم. در این حالت مسائل احتراقی از دیدگاه وابستگی به زمان به مسائل پایا^۱ و ناپایا^۲، از دیدگاه مختصات فضایی حاکم به مسائل یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی، از دیدگاه شرایط اولیه واکنشگرها به مسائل پیش مخلوط^۳ و غیرپیش مخلوط^۴، از نقطه نظر شرایط جریان به مسائل آرام و توربولانت، از نظر فاز واکنشگرها به مسائل تک فاز یا چندفازی و از دیدگاه نرخ واکنش به مسائل تعادل شیمیایی^۵ با نرخ واکنش نامحدود و مسائل با نرخ واکنش محدود تقسیم بندی می‌شوند. برای مدل‌سازی تئوری یک مسأله احتراقی، المان‌های متعددی مورد نیاز است. این المان‌ها شامل المان‌های اصلی و فرعی بوده که همگی با یکدیگر در ارتباط می‌باشند. المان اصلی در تشکیل مدل احتراقی معادلات حاکم می‌باشد که خود شامل معادلات بقا و معادلات انتقال است. شاخه‌های مختلف که با این المان

¹ Steady

² Unsteady

³ Premixed

⁴ Non-premixed

⁵ Chemical Equilibrium

در ارتباطند شامل شرایط اولیه^۱ و شرایط مرزی^۲، معادله حالت گاز، اطلاعات سینتیکی، خواص و ویژگی های ساختاری مواد و خواص ترمودینامیکی و انتقالی می باشند.

معادلات بقا شامل معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی، معادله بقای جز مولکولی یا اتمی، معادله بقای مومنتم، معادله بقای انرژی و معادله بقای مومنتم زاویه ای می باشد.

معادلات انتقال نیز شامل انتقال انرژی جنبشی توربولانت، انتقال نرخ اتلاف توربولانت، انتقال تنش های رینولدز و ... می باشد.

فرضیات مرسوم می که در مبحث مدل سازی احتراق به منظور ساده سازی حل معادلات حاکم مطرح می شود عبارتند از:

- سیال کاری به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می شود.

- گازها در حالت ایده آل فرض می شوند.

کوره ها از چند جهت می توانند مورد بررسی قرار می گیرند یکی از لحاظ انرژی و اگرژی و دیگری از لحاظ آلاینده گی

۲-۳- بیان قوانین اول و دوم ترمودینامیک

۲-۳-۱- قانون اول ترمودینامیک

قانون اول همان اصل بقای انرژی است که بیان می کند در طول یک فرایند انرژی می تواند از یک فرم به فرم دیگر تبدیل شود ولی مقدار آن ثابت می ماند [۶].

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (1-2)$$

انرژی می تواند به سه فرم تبدیل شود: گرمایی، کار و جریان جرم. گرما و کار برابر با انتقال حرارت و کار به داخل یا خارج حجم کنترل است.

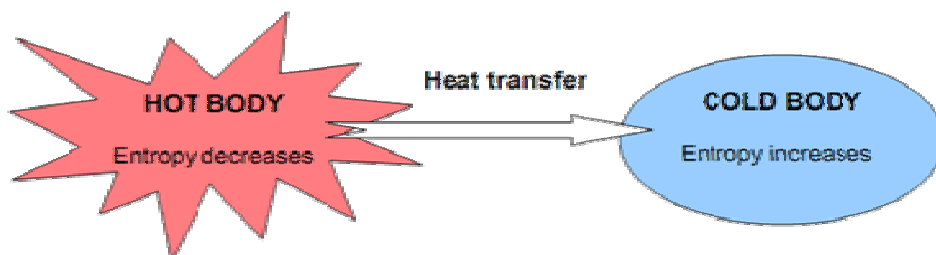
¹ Initial Condition

² Boundary Condition

انقلاب صنعتی نتیجه کشف چگونگی بهره برداری از انرژی و تبدیل گرما به کار است. طبیعت این اجازه را می‌دهد که کار به طور کامل به گرما تبدیل شود ولی گرما به طور کامل به کار تبدیل نمی‌شود. قانون اول فقط در مورد کمیت انرژی است و هیچ اطلاعاتی در مورد جهت فرایندها و کیفیت انرژی نمی‌دهد.

۲-۳-۲- آنتروپی

کلازیوس در سال ۱۸۶۵ متوجه خاصیت جدیدی در ترمودینامیک شد و این خاصیت را آنتروپی نامید. تفاوت بین فرایندهای بازگشت پذیر و بازگشت ناپذیر اولین بار در ترمودینامیک به وسیله مفهوم آنتروپی بیان شد. آنتروپی یک سیستم درجه بی نظمی سیستم را نشان می‌دهد. آنتروپی در یک سیستم فقط می‌تواند تولید شود ولی از بین نمی‌رود و به وسیله انتقال انرژی از مرزهای یک سیستم افزایش یا کاهش می‌یابد. در شکل ۲-۵ ملاحظه می‌شود که آنتروپی جسم سرد که در ارتباط با جسم گرم است، افزایش می‌یابد و آنتروپی جسم گرم کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۵: افزایش و کاهش آنتروپی در اجسام سرد و گرم [۷]

دلایل بازگشت ناپذیری‌ها

- تراکم یا انبساط سریع
- انتقال گرما
- اصطکاک
- اختلاط

در احتراق هر یک از عوامل بالا باعث ایجاد بازگشت ناپذیری می‌شوند.

شدت تغییر آنتروپی برای یک حجم کنترل را به صورت زیر می‌توان نوشت: [۸]

شدت تغییر آنتروپی = (شدت انتقال آنتروپی توسط جریان جرمی) + (شدت انتقال آنتروپی توسط انتقال حرارت) + (شدت تولید آنتروپی توسط بازگشت ناپذیری ها)

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = \sum_{in} \dot{m}_i s_i - \sum_{out} \dot{m}_e s_e + \sum_{j=1} \frac{Q_j}{T_j} + \dot{\sigma}_{cv} \quad (2-2)$$

برای بیان اینکه انرژی کیفیت نیز دارد و فرایندها در هر جهتی نمی‌توانند پیش روند از مفهوم قانون دوم ترمودینامیک استفاده می‌شود.

۲-۳-۳- قانون دوم ترمودینامیک

نامساوی کلازیوس برای سیکل کامل [۶]:

$$\oint (\delta Q / T) \leq 0 \quad (3-2)$$

تولید آنتروپی در یک سیکل (معیار بازگشت ناپذیری)

$$S_{gen} = -\oint (\delta Q / T) \quad (4-2)$$

$$S_{gen} = \Delta S_{total} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{surr} \quad (5-2)$$

بیان کلی قانون دوم ترمودینامیک در یک فرایند:

$$\Delta S \geq \int_1^2 (\delta Q / T) \quad (6-2)$$

قابلیت کاردهی (اگزرژی) یک خاصیت ترمودینامیکی است که کیفیت انرژی را به طور کمی نشان می‌دهد، اما بر خلاف انرژی پایستار نیست.

۲-۴- اهمیت مسأله

رشد روزافزون استفاده از انرژی و تقاضاهای اقتصادی و محیطی، استفاده کارا از منابع انرژی طبیعی را فرا می‌خواند. یک معیار مهم ترمودینامیکی در اندازه گیری هزینه کلی انرژی هر فرایند، تحلیل ترکیبی انرژی و

اگر رژی ناشی از بازگشت ناپذیری‌های فرایند است. اکثراً در همه تحلیل‌ها، منبع اصلی بازگشت ناپذیری، مبادله انرژی گرمایی داخلی به دلیل گرادیان‌های دمایی بالا است که باعث هدر رفتن گرما در واکنش‌های احتراق می‌شود. روش اولیه برای جلوگیری از اتلاف انرژی در یک فرایند احتراق کاهش بازگشت ناپذیری‌های ناشی از هدایت گرمایی است که دستیابی به مقدار بالای دمای شعله باعث گرادیان‌های دمایی کمتر می‌شود. شرایط کاری اپتیمم در این زمینه از مطالعات پارامتریک روی بازگشت ناپذیری احتراق در انواع مختلف شعله‌ها مشخص می‌شود.

در سال ۲۰۰۳ تقریباً ۸۶٪ کل انرژی تولید شده از منابع انرژی اولیه از احتراق به دست آمد. نفت، گاز طبیعی و زغال سه رکن اصلی تأمین انرژی بودند. سهم احتراق در تولید انرژی در چهار بخش اصلی استفاده می‌شود که عبارتند از: بخش نیرو، جاهای مسکونی (منزل، بیمارستان‌ها، مدارس و ...)، تجارتی، صنعتی و حمل و نقل.

در اینجا عملکرد کارا در مشعل‌ها اهمیت می‌یابد. هر دو مسأله هزینه‌های اقتصادی و صدمه به محیط زیست باعث افزایش تقاضا برای افزایش کارایی سیستم (مینیمم سازی تلفات) می‌شود. کارایی یک وسیله به صورت نسبت انرژی تبدیل شده به حالت قبل از تبدیل تعریف می‌شود. در یک مشعل انرژی شیمیایی سوخت تبدیل به انرژی گرمایی می‌شود. بنابراین تعریف قراردادی کارایی یک مشعل نشان می‌دهد که انرژی گرمایی زیادی برای استفاده از انرژی شیمیایی ذخیره شده در سوخت موجود است. اتلافات در مشعل که باعث کاهش کارایی سوخت می‌شود عبارتند از: سوخت نسوخته، احتراق ناقص و اتلاف گرما از دیواره مشعل.

تعداد زیادی از محققین، بررسی بیشتری در حوزه انتقال گرما در احتراق صنعتی به دلایل زیاد توصیه نمودند. یک دلیل واضح، افزایش کارایی سوخت و استفاده بهینه از انرژی در احتراق سوخت‌های فسیلی است. دلیل دیگر بهینه کردن فرایندهای موجود برای افزایش عملکرد یا بازده یک سیستم احتراق است. ناولز^۱ و همکارانش [۹] (۱۹۸۶) سیستم‌های گازی احتراق آینده را شامل انتقال گرما و کوره‌های دما بالای پیش گرمایش هوا و شار گرمایی بالا توصیف نمودند. پل^۲ و همکاران [۱۰] (۱۹۸۶) ۱۵ پیشنهاد برای تحقیق در بهبود کارایی انرژی در صنایع ارائه دادند. پیشنهادات اصلی که شامل انتقال گرما بود، عبارتند از:

- طرح کوره

- الگوهای مخلوط شدن

¹ Knowles

² Pohl

- بازیافت گرما

وایلد^۱ [۱۱] (۱۹۸۶) برای حل بعضی از مسائل در صنعت فولاد پیشنهاداتی ارائه کرد. پیشنهادات در راستای انتقال گرما شامل موارد زیر بود:

- دیواره‌های کوچک‌تر کوره اتلاف گرما و نفوذ هوا را کاهش می‌دهد.

- بهبود کیفیت شعله برای بهینه سازی عملکرد کوره

گوپتا^۲ و لیلی^۳ [۱۲] (۱۹۸۷) در مورد نیازهای تحقیق در سیستم‌های احتراق عملی بحث نمودند. پیشنهادات به دو قسمت تجربی و محاسباتی تقسیم شد. به صورت تجربی موارد زیر بایستی بیشتر مورد بررسی قرار گیرند:

- مسائل دینامیک سیالات شامل اندازه گیری‌های سرعت و ذره در جریان‌های دوفازی، اندازه گیری اندرکنشهای توربولانس ذرات

- توسعه ابزار تشخیصی شامل تشخیص جریان‌های دوفازی، بهبود در اندازه گیری سرعت جریان و استفاده از دستگاه‌های لیزری و اندازه گیری‌های طیفی لیزری

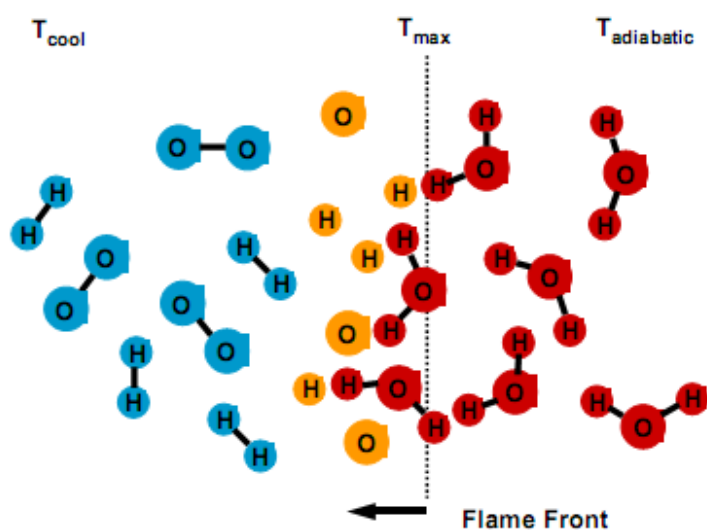
تعریف قراردادی کارایی احتراق، هیچ توجهی به کیفیت انرژی گرمایی از مشعل که در محصولات احتراق است، ندارد. برای مثال اگر احتراق یک سوخت با هوا را در نظر بگیریم، دمای نهایی محصول احتراق بستگی به مقدار هوای فراهم شده دارد. افزایش مقدار هوا، دمای محصولات گازی را کاهش می‌دهد ولی محتوای انرژی گاز با فرض دیواره‌های آدیاباتیک در همان مقدار باقی می‌ماند. بنابراین پتانسیل کار تولیدی محصول، که با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک به دست می‌آید کاهش می‌یابد. اگر انرژی واژه‌ای است که برای توصیف پتانسیل کار تولیدی از انرژی (بخش مفید انرژی) استفاده می‌شود. بنابراین بهینه سازی بر اساس انرژی مشعل‌ها اهمیت می‌یابد. بسیاری از تحقیق‌ها نقش تحلیل انرژی را برای برآورد سیستم‌های ترمودینامیکی نشان می‌دهد. بر اساس آن‌ها تحلیل بر اساس انرژی اغلب منجر به عدم موفقیت در تعیین انحراف از حالت ایده آل می‌شود. در یک فرایند ایده آل برگشت پذیر اتلاف انرژی نیست ولی در فرایندهای واقعی بازگشت ناپذیری‌ها، باعث اتلاف انرژی می‌شوند. تعدادی از مطالعات در فرایند احتراق نشان دهنده

¹ Wilde

² Gupta

³ Lilly

وجود بازگشت ناپذیری‌های ذاتی ترمودینامیکی هستند که باعث اتلاف انرژی می‌شوند. بررسی سیستم‌های احتراق نشان می‌دهد که حدود یک سوم انرژی سوخت به شکل غیر قابل بازگشت پذیر در مشعل درمی‌آید. بسیاری از این بازگشت ناپذیری‌ها به دلیل انتقال گرمای داخلی مشعل بین محصولات و واکنش دهنده‌ها است. شکل ۲-۶ نشان می‌دهد که چگونه آنتروپی با انتقال گرمای داخلی در یک واکنش هیدروژن - اکسیژن تولید می‌شود. بیشترین کارایی موثر زمانی به دست می‌آید که اتلاف انرژی در فرایند مینیمم باشد.



شکل ۲-۶: شکل شماتیکی از چگونگی تولید آنتروپی در جلوی شعله هیدروژن - اکسیژن ناشی از انتقال گرمای داخلی. مولکول‌های پرانرژی محصولات در برخورد با مولکول‌های سرد واکنش دهنده‌ها در اطراف انرژی خود را از دست می‌دهند. داو^۱ و همکاران [۱۳]

لیور^۲ و همکارانش در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۶ ضرورت تحلیل فرایندهای احتراق بر اساس قانون دوم را با اهداف زیر خلاصه نمودند:

- تعیین فرایندهایی که اتلاف انرژی یا برگشت ناپذیری زیاد دارد.

- دلایل اتلافات و بازگشت ناپذیری‌ها

- پیش بینی رفتار سیستم با تغییر در پارامترهای فرایند

¹ Daw

² Lior

-نتایج و عواقب موارد بالا و پیشنهادهایی برای بهبود فرایند

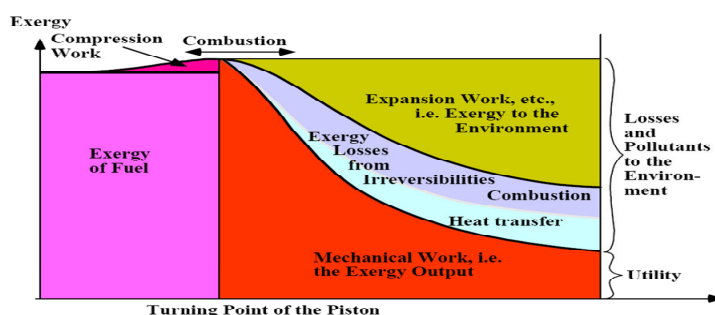
۲-۵- مفاهیم اصلی

۲-۵-۱ اگزرژی

برای توضیح مفهوم اگزرژی باید موارد زیر را در نظر گرفت [۷]:

- یک سیستم در تعادل کامل با محیط هیچ اگزرژی ندارد.
- انحراف بیشتر سیستم از محیط اگزرژی بیشتری به دنبال دارد.
- وقتی کیفیت انرژی از دست می‌رود اگزرژی تلف می‌شود. اگزرژی بخش مفید انرژی است و بنابراین بررسی آن از نظر اقتصادی اهمیت دارد.

شکل ۲-۷ اتلاف اگزرژی در احتراق یک موتور را که به دلایل مختلف رخ می‌دهد، نشان می‌دهد.



شکل ۲-۷: اتلاف اگزرژی در احتراق یک موتور

جدول ۲-۱: تفاوت‌های اگزرژی و انرژی [۷]

The energy change of a process is...	The exergy change of a process is...
Its ability to produce motion	Its ability to produce work
Conserved by the first law of thermodynamics	Only conserved for reversible processes and destroyed by irreversible processes
Different from zero ($E = mc^2$)	Equal to zero when at equilibrium with the environment
Independent of environment parameters	Dependent on environment parameters
Limited by the second law of thermodynamics for all processes	Unlimited for reversible processes due to the second law
A measure of quantity only	A measure of quantity and efficiency of utilization

Where E = Energy, m = mass, and c = Speed of light

مفهوم انرژی یک نتیجه مستقیم از قانون دوم ترمودینامیک است. انرژی یک سیستم بر اساس پتانسیل کاری نسبت به یک محیط مرجع تعریف می‌شود. واژه پتانسیل کاری از نظر فیزیکی به ماکزیمم کار تئوریک به دست آمده اشاره دارد. انرژی یک خاصیت ترکیبی بین سیستم و محیط مرجع است. در حالت کلی انرژی تعیین شده بدین صورت تعیین می‌شود:

$$A = k + \varphi + (u - u_r) + p_r(v - v_r) - T_r(s - s_r) + a_{ch} \quad (7-2)$$

k انرژی جنبشی ویژه سیستم و φ انرژی پتانسیل به ازای واحد جرم ناشی از هر میدان نیروی پایا است. T و P و u و v و s به ترتیب دما، فشار، انرژی بین مولکولی، حجم ویژه و آنترופی ویژه هستند و a_{ch} معرف انرژی شیمیایی خاص است. اندیس r معرف خاصیت‌های مربوط به محیط مرجع است.

۲-۵-۲- بازگشت ناپذیری و دلایل آن

هر فرایند طبیعی، انرژی کلی همه سیستم‌های در حال واکنش در فرایندها را آزاد می‌کند. (انرژی جهان در حال کاهش است) این به عنوان قانون تنزل انرژی شناخته شده است. اتلاف انرژی بر اساس بازگشت ناپذیری که ویژگی‌های ترمودینامیکی فرایند را در نظر می‌گیرد مشخص می‌شود. همه فرایندهای طبیعی بازگشت ناپذیر هستند. دلایل بازگشت ناپذیری در یک فرایند طبیعی بدین صورت است: ۱- فقدان تعادل ترمودینامیکی ۲- اتلافات در اثر فرایندهای طبیعی. بازگشت ناپذیری ترمودینامیکی در یک فرایند به وسیله تولید آنترופی توصیف می‌شود که برای فرایندهای پیوسته در یک سیستم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{I} = T_r \dot{S}_g \quad (8-2)$$

که \dot{I} نرخ اتلاف انرژی و \dot{S}_g نرخ تولید آنترופی است که به عنوان معادله گوی - استدلال شناخته شده است [۱۴].

یک سیستم مهندسی در حالت کلی شامل یک تعداد از فرایندهای فیزیکی پیوسته است. تولید آنترופی ناشی از همه فرایندها روی هم رفته بازگشت ناپذیری سیستم را مشخص می‌کند.

۲-۵-۳- کارایی انرژی

پارامتری که اتلاف انرژی در انجام یک فرایند را اندازه می‌گیرد به عنوان کارایی انرژی (یا کارایی قانون دوم) شناخته می‌شود. پایین‌ترین بازگشت ناپذیری، بالاترین کارایی انرژی را نتیجه می‌دهد. در

تعیین کارایی اگزرتیکی یک فرایند که در یک سیستم انجام می‌شود، بایستی کمیت‌های اگزرتی را که از مرزهای سیستم عبور می‌کنند در نظر گرفت مانند اگزرتی ناشی از انتقال جرم، یا انتقال اگزرتی در اثر انتقال کمیت‌های انرژی (گرما یا کار).

یک سیستم احتراق در حالت کلی شامل تعدادی از فرایندهای پیوسته انتقال شیبه جابه جایی، دیفیوژنی، جرم، مومنت و انرژی در طول واکنش‌های شیمیایی فرایند است. همه این فرایندها می‌توانند هم در جریان توربولانت و هم در جریان لامینار روی دهند. کارایی اگزرتیکی (یا قانون دوم) یک سیستم احتراق به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta_{\Pi} = \frac{\dot{A}_{ext}}{\dot{A}_{in} - \dot{Q}\left(1 - \left(\frac{T_r}{T}\right)\right)} \quad (9-2)$$

که \dot{A}_{ext} و \dot{A}_{in} به ترتیب میزان اگزرتی جریان در ورود و خروج از مشعل است. \dot{Q} میزان اتلاف گرما از سیستم احتراق و T نماینده دما در سطح مرزی مشعل است. از تعادل اگزرتی می‌توان نوشت:

$$\dot{I} = \dot{A}_{in} - \dot{A}_{ext} - \dot{Q}\left(1 - \frac{T_r}{T}\right) \quad (10-2)$$

$$\eta_{\Pi} = 1 - \frac{\dot{I}}{\dot{A}_{in} - \dot{Q}\left(1 - \left(\frac{T_r}{T}\right)\right)} \quad (11-2)$$

برای مشعل آدیاباتیک: $\dot{Q} = 0$

$$\eta_{\Pi} = \frac{\dot{A}_{ext}}{\dot{A}_{in}} = 1 - \frac{\dot{I}}{\dot{A}_{in}} \quad (12-2)$$

۲-۶- ره یافت تحلیل اگزرتی در سیستم‌های احتراق

۲-۶-۱- سیستم‌های احتراق مختلف

در جهان عمل احتراق در وسایل گوناگونی از ساده‌ترین مانند شمع تا پیچیده‌ترین مانند راکت انجام می‌شود. با این حال اختلافات اساسی در فرایندهای شامل احتراق بیشتر از یک لحاظ است. بورمن^۱ و رقلند^۲ [۱۵] مثال‌های تحلیلی از احتراق در بسیاری وسایل مهم ذکر نموده‌اند. یک راه تشخیص دادن رفتار احتراق در سیستم‌های عملی بر اساس سوختی است که سوزانده می‌شود. با وجود اینکه قسمت اصلی سوخت‌هایی که در احتراق استفاده می‌شود هیدروکربن‌ها هستند، ولی ترکیب سوخت فرق می‌کند و بنابراین سوخت می‌تواند هم در فاز گازی، مایع یا جامد باشد. سوخت‌های گازی می‌توانند به آسانی با اکسیدکننده به طور همگن (یکنواخت) مخلوط شوند.

۲-۶-۲- فرایندهای فیزیکی در یک سیستم احتراق

تعدادی از فرایندهای فیزیکی واکنش در یک سیستم احتراق برای آغاز و تقویت واکنش احتراق است. نیاز اولیه برای واکنش احتراق، آمیزش سوخت و اکسیدکننده است در حدی که تماس در حد مولکولی برقرار شود. فرایندهای فیزیکی در سیستم به طور وسیع در دو دسته تقسیم بندی می‌شوند: ۱- فرایندهای انتقال ۲- واکنش‌های شیمیایی. فرایندهای انتقال وابسته به انتقال مومنتم، جرم و انرژی هستند که شامل فرایندهای دیفیوژنی و جابه‌جایی آن کمیت‌ها است. توربولانس یک نقش کلیدی اضافی در انتقال مومنتم، جرم و انرژی ایفا می‌کند. از لحاظ فیزیکی فرایندهای انتقال به وسیله سه معادله بقا به دست می‌آیند که شامل معادلات بقای جرم گونه‌های جزئی، بقای مومنتم و معادله بقای انرژی هستند.

۲-۶-۳- تحلیل انرژی بر اساس تعادل انرژی: رهیافت ۱

یکی از راه‌های تحلیل یک مشعل بالانس انرژی در آن است. یک مشعل را در نظر بگیرید که سوخت و هوا به صورت جداگانه یا به شکل یک ترکیب وارد مشعل می‌شوند. بنابراین امکان محاسبه نرخ جریان انرژی در ورود مشعل هست که شامل انرژی شیمیایی سوخت و انرژی ترمومکانیکی (فیزیکی) سوخت و هوا است. انرژی جریان خارجی با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل احتراق محاسبه می‌شود. دقت نتیجه بستگی به دقت تحلیل احتراق انجام شده دارد.

۲-۶-۳-۱- رهیافت تعادل

¹ Borman

² Regland

ساده‌ترین روش محاسبه در نظر گرفتن یک مدل صفربعدی است که فرض می‌شود محصولات به عنوان یک مخلوط همگن در یک فشار و دمای معین هستند. اگر یک مثال از مشعل جریان متان در هوا در نظر گرفته شود، میزان جریان آگزرژی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{A}_{in} = \dot{m}_a a_a^{in} + \dot{m}_f a_f^{in} \quad (13-2)$$

که \dot{m}_f و \dot{m}_a به ترتیب نرخ‌های جریان هوا و سوخت در مشعل هستند و a_f^{in} و a_a^{in} به ترتیب آگزرژی مخصوص هوا و سوخت در ورودی هستند. در فرضیات، هوا به عنوان گاز ایده آل در نظر گرفته می‌شود و آگزرژی مخصوص جریان هوا با فرض سهم ترمودینامیکی از معادله زیر مشخص می‌شود:

$$a_a^{in} = (h_a^{in} - h_r) - T_r (s_e^{in} - s_r) \quad (14-2)$$

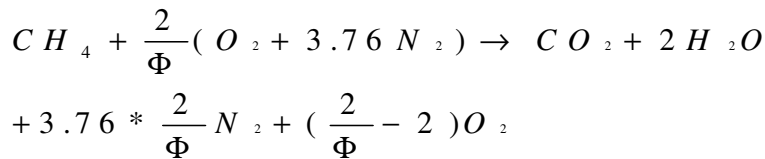
در معادله h و s به ترتیب آنتالپی مخصوص و آنتروپی مخصوص هستند و زیرنویس a هوا و r محیط مرجع است. اندیس بالای in همان شرایط ورودی است. ترم‌های طرف راست به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$h_a^{in} - h_r = \int_{T_r}^{T_a^{in}} c_{p_a}(T) dT \quad (15-2)$$

$$(s_a^{in} - s_r) = \int_{T_r}^{T_a^{in}} \frac{c_{p_a}(T)}{T} dT - \frac{\bar{R}}{M_a} \int_{p_r}^{p_a^{in}} \frac{dp}{p} \quad (16-2)$$

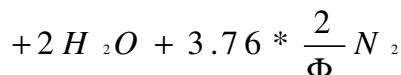
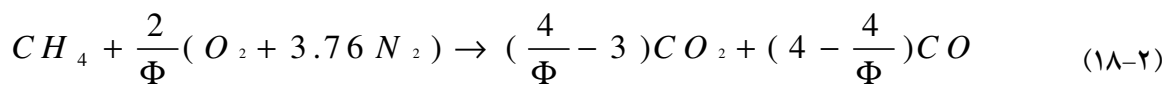
در معادلات بالا $c_{p_a}(T)$ معرف گرمای ویژه هوا به عنوان تابعی از دما، \bar{R} و M_a به ترتیب ثابت جهانی گاز و وزن مولکولی هوا است. T_a^{in} و p_a^{in} به ترتیب دما و فشار هوای ورودی هستند و T_r و p_r به ترتیب دما و فشار مرجع هستند. آگزرژی مخصوص جریان سوخت شامل هر دو مؤلفه آگزرژی شیمیایی و ترمومکانیکی است. مؤلفه ترمومکانیکی با در نظر گرفتن ویژگی‌های متناظر و حالت سوخت به جای هوا و فرض سوخت به عنوان گاز ایده آل محاسبه می‌شود. مؤلفه شیمیایی آگزرژی به نوع سوخت بستگی دارد و بر اساس واکنش استوکیومتریکی و فرض احتراق کامل سوخت محاسبه می‌شود. واکنش شیمیایی سوخت با هوا به عنوان واکنش یک مرحله‌ای در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود هوای کافی برای کامل شدن احتراق وجود دارد که به صورت زیر است:

(۱۷-۲)



در معادله بالا Φ نشان دهنده نسبت اکیوالانس است.

در حالت ناکافی بودن هوا، فرض می شود اکسیژن هوا با هیدروژن موجود در سوخت برای تولید آب ترکیب می شود. سپس اکسیژن کربن را به مونواکسید کربن تبدیل می کند، مقداری که تبدیل به دی اکسید کربن می شود بستگی به دسترس پذیر بودن اکسیژن دارد. فرض بالا برای نوشتن معادله شیمیایی در حالت استوکیومتریکی منطقی است. واکنش به صورت زیر می تواند بیان شود:



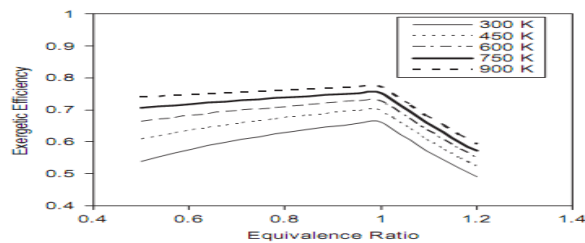
در حالتی که مشعل آدیاباتیک باشد، انتقال انرژی در عرض آن نیست. بنابراین معادله انرژی دمای محصولات گازی را در خروجی مشعل T_a به عنوان دمای آدیاباتیک شعله با در نظر گرفتن تغییرات گرمای مخصوص گونه های محصولات با دما می دهد. نرخ انرژی جریان خروجی از مشعل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\dot{A}_{ext} = \sum_k \dot{m}_k^{ex} [(h_k^{ex} - h_r) - T_r (S_k^{ex} - s_r)] \quad (۱۹-۲)$$

که k معرف هر گونه در جریان محصولات خروجی است. ویژگی های خروج (دما و فشار) برای محاسبه در معادله بالا استفاده شده است.

در شکل ۲-۸ تغییرات کارایی انرژی احتراق که با معادله $\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{ext}}{\dot{A}_{in}}$ تعریف شده، با تغییر نسبت

اکیوالانس برای دماهای مختلف هوای ورودی نشان داده شده است. دمای سوخت در ورود مشعل برابر ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده و مشعل در فشار یک اتمسفر عمل می کند. نتایج نشان می دهد که کارایی قانون دوم برای حالت استوکیومتریکی هوا ماکزیمم است.



شکل ۲-۸: تغییرات کارایی آگزرتیکی با نسبت اکیوالانس مخلوط واکنش دهنده‌ها در دماهای مختلف هوای ورودی محاسبه شده با رهیافت تعادل

دمای پایین تر محصولات گازی در خروج برای یک مخلوط رقیق با هوای اضافی، کارایی قانون دوم شعله را کاهش می‌دهد. این برخلاف این حقیقت است که انرژی ذخیره شده در سوخت، با کامل شدن احتراق سوخت در حالت مخلوط رقیق سوخت - هوا در شعله آدیاباتیک در محصولات گازی موجود است. بنابراین مشهود است که کامل شدن احتراق و یا محتوای انرژی محصولات گازی، کارایی آگزرتیکی مشعل را تعیین نمی‌کند. دمای خروجی محصولات گازی در خروج مشعل با افزایش هوای ورودی کاهش می‌یابد و ماکزیمم توانایی آن را برای انجام کار مفید کاهش می‌دهد، بنابراین کارایی قانون دوم کاهش می‌یابد. کاهش مشابهی در کارایی آگزرتیکی در حالت وجود هوای ناکافی، با کاهش دمای خروجی به دلیل آزاد شدن ناکامل انرژی ذخیره شده در سوخت مشاهده می‌شود.

۲-۶-۳-۲- تحلیل طبیعی

همان طور که به وسیله لیور اشاره شد توسعه سطح سیستم بر اساس محاسبات آگزرتی اغلب با استفاده از رهیافت تعادل صورت می‌گیرد که داده‌های حالت تعادل را در ورود و خروج مشعل برای محاسبه آگزرتی در نظر می‌گیرد. با این حال چنین تعادل‌هایی ممکن نیست در حالت واقعی در مشعل اتفاق افتد. توزیع صحیح سرعت، دما و تمرکز گونه‌ها در مشعل به صورت عددی از حل جزئیات جریان واکنش دهنده داخل مشعل می‌تواند به دست آید. این نیاز به حل پیوسته کل میدان و معادلات حالت شامل ناوراستوکس، انرژی، بقای گونه‌ها و معادلات ترمودینامیکی با معادلات سینتیکی دارد. پارامترهای میدان در معادله انتقال آگزرتی برای به دست آوردن تغییرات شدت آگزرتی بین ورود و خروج برای محاسبه اتلاف آگزرتی استفاده می‌شوند. توزیع جداگانه اتلاف آگزرتی جنبشی، پتانسیل، گرمایی و شیمیایی می‌تواند از محاسبات به دست آید. فرم‌های بسط یافته مؤلفه‌های آگزرتی در کار لیور^۱ [۱۶] و لیور و همکاران [۱۷] آورده شده است.

¹ Lior