بسم الله الرحمن الرحیم

**فهرست مطالب**

**عنوان** **صفحه**


فهرست مطالب هشت

چکیده ۱

**فصل اول: مقدمه**

۱- ۱ مقدمه ۲

۱-۲ هدف از بازیافت انرژی ۲

۱-۲-۱ صرفه جویی در مصرف انرژی ۲

۱-۲-۲ حل معضلات آلودگی های زیست محیطی ۳

۱-۲-۳ دلایل اقتصادی ۵

۱-۲-۴ ذخیره و نگهداری از منابع ملی یک کشور ۶

۱-۳ بازیافت انرژی ۷

۱-۴ عوامل موثر در انتخاب روش بازیافت انرژی ۸

۱-۵ انتخاب طرح بازیافت انرژی ۹

۱-۵-۱ منابع گرمایی با دمای بالا ۱۰

۱-۵-۲ منابع گرمایی با دمای متوسط ۱۰

۱-۵-۳ منابع گرمایی با دمای پایین ۱۱

۱-۶ کاربردهای بازیافت انرژی ۱۲

۱-۷ مروری بر فصول بعد ۱۲

**فصل دوم: مروری بر منابع**

۲-۱ دستگاه های بازیافت انرژی ۱۳

۲-۲ روش های استفاده از انرژی بازیافتی ۱۴

۲-۲-۱ استفاده مستقیم ۱۴

۲-۲-۲ استفاده از مبدل های حرارتی احیا شونده ۱۴

۲-۲-۳ استفاده از مبدل های حرارتی بهبود دهنده ۱۵

۲-۲-۴ استفاده از waste heat boiler ۱۶

۲-۲-۵ استفاده از مشعل های خودبازیاب ۱۶

۱-۳ مقایسه مبدل های ریژنراتور و ریکوپراتور ۱۸

۲-۴ دستگاه ریژنراتور ۱۹

۲-۴-۱ نحوه ی عملکرد کلی ۱۹

۲-۴-۲ دستگاه های ریژنراتور با بستر چرخشی ۲۰

۲-۴-۳ دستگاه ریژنراتور با بستر ثابت ۲۲

۲-۵ آکنه ها ۲۶

۲-۵-۱ ریژنراتورهای دمای بالا ۲۶
۲-۵-۲ ریژنراتورهای دما متوسط ۲۶
۲-۵-۳ ریژنراتورهای دما پایین ۲۶
۲-۶ مروری بر مدل های ارائه شده ۲۷
۲-۶-۱ مدل ناسلت ۲۷
۲-۶-۲ مدل شومن ۲۹
۲-۶-۳ مدل هاوسن ۳۰
۲-۶-۴ مدل هگس ۳۱
۲-۶-۵ مدل مورالیکریشنا ۳۱

**فصل سوم: مدل سازی ریاضی**
۳-۱ مقدمه ۳۲
۳-۲ کاربرد مدل سازی ۳۲
۳-۳ ارائه ی مدل ۳۵
۳-۴ توصیف روش حل و پارامترها ۳۹
۳-۴-۱ بی بعد سازی معادلات ۳۹
۳-۴-۲ تعیین ضریب انتقال حرارت جابه جایی $h_c$ ۴۲
۳-۴-۳ تعیین ضریب انتقال حرارت تشعشعی ۴۴
۳-۵ حل مدل ریاضی ۴۵
۳-۶ شبیه سازی ۴۹

**فصل چهارم: طراحی و ساخت یک سامانه ریژنراتور بستر ثابت**
۴-۱ مقدمه ۵۳
۴-۲ بستر و قطعات جانبی آن ۵۴
۴-۳ کمپرسور ۵۴
۴-۴ گرم کن ۵۵
۴-۵ آکنه ها ۵۵
۴-۶ عایق ۵۶
۴-۷ اتصالات ۵۷
۴-۸ ترموستات کنترل کننده ۵۷
۴-۹ فشار سنج ۵۹
۴-۱۰ سرعت سنج دیجیتال ۵۹
۴-۱۱ نحوه ی انجام آزمایش ها ۶۱
۴-۱۱-۱ روش های مختلف انجام آزمایش ها ۶۱
۴-۱۱-۲ شرح آزمایش ۶۲

**فصل پنجم: نتایج، بحث و بررسی**


۵-۱ مقدمه ۶۴

۵-۲ محاسبه ی راندمان تجربی ۶۴

۵-۳ بررسی انطباق نتایج مدل معرفی شده در فصل سوم با نتایج آزمایشگاهی ۶۵

۵-۴ بررسی اثر دبی هوای ورودی و زمان تناوب بر عملکرد سامانه ریژنراتور بستر ثابت ۶۸

۵-۵ بررسی اثر اندازه قطر آکنه ها بر عملکرد سامانه ریژنراتور بستر ثابت ۷۸

۵-۶ منابع خطا ۷۹

۵-۶-۱ خطای شخصی ۷۹

۵-۶-۲ خطای عایق بندی ۷۹

۵-۶-۳ خطای دستگاه های اندازه گیری ۷۹

۵-۶-۴ خطای شرایط فیزیکی دستگاه ۸۰

۵-۶-۵ خطای محاسباتی ۸۱

۵-۶-۶ عدم توسعه یافتگی جریان ۸۱

۵-۶-۷ خطاهای ناشی از نوسانات سرعت ۸۱

۵-۶-۸ خطاهای ناشی از نوسانات دمایی ۸۱

**فصل ششم: جمع بندی و پیشنهادات**

۶-۱ نتیجه گیری ۸۲

۶-۲ پیشنهاداتی جهت ادامه ی کار ۸۳

**پیوست ها**

منابع

**چکیده:**

افزایش روز افزون قیمت سوخت های فسیلی، کاهش منابع و لزوم کنترل آلودگی محیط زیست ، اهمیت بازیافت انرژی حرارتی و جلوگیری از اتلاف آن را در صنایع مختلف نشان می دهد. امروزه مصرف انرژی به عنوان یکی از شاخص های عمده در ارزیابی توسعه یافتگی جوامع مطرح گردیده است. به همین منظور انواع مختلفی از سامانه های بازیافت انرژی حرارتی طراحی و ساخته شده است. یکی از این سامانه ها ریژنراتورهای بستر ثابت می باشد که کاربرد گسترده ای در صنایع انرژی بر همچون صنایع تولید شیشه و ذوب آلومینیوم دارد. این سامانه با پیش گرم کردن هوای احتراق در کوره های این صنایع به کاهش مصرف انرژی کمک شایانی می کند.

این پژوهش به ارائه یک مدل ریاضی حاصل از دو مکانیزم انتقال حرارت جابه جایی و هدایت شعاعی در ریژنراتور های بستر ثابت پر شده باآکنه های کروی خواهد پرداخت. جهت شبیه سازی این سامانه، نرم افزاری به زبان ویژوال بیسیک (VB) با روش حل عددی تفاضل محدود تولید گردیده است. به منظور ارزیابی صحت مدل و بررسی اثر پارامترهای مختلف مانند دبی جرمی، زمان تناوب و اندازه ی قطر آکنه های کروی بر روی عملکرد این سامانه، یک نمونه ی آزمایشگاهی از این سامانه با آکنه های کروی از جنس آلومینا طراحی و ساخته شده است. نتایج نشان می دهد با کاهش پنجاه درصدی دبی سیال ورودی در یک زمان مشخص می توان راندمان بازیابی حرارتی از سامانه را تا بیش از ۲۰ ٪ افزایش داد، همچنین در یک زمان مشخص می توان با نصف کردن قطر آکنه های موجود در بستر بیش از ۳۰ ٪ راندمان بازیابی حرارتی از سامانه را افزایش داد.

کلمات کلیدی: بازیافت انرژی حرارتی، ریژنراتور بستر ثابت، آکنه کروی، مدل سازی، تفاضل محدود، شبیه سازی.

# مقدمه
# اهمیت بازیافت انرژی در صنعت

## ۱-۱ مقدمه

افزایش روز افزون قیمت سوخت، کاهش منابع سوخت فسیلی و لزوم کنترل آلودگی های محیط زیست اهمیت بازیافت انرژی حرارتی و جلوگیری از اتلاف آن را در صنایع مختلف نشان می دهد. امروزه مصرف بهینه انرژی به عنوان یکی از شاخص های عمده در ارزیابی توسعه یافتگی جوامع مطرح گردیده است. شدت بالای مصرف انرژی در فرایندهای شیمیایی، سبب افزایش هزینه های تولیدی و کاربردی و نیز کاهش راندمان استحصال مواد در محصولات صنعتی گردیده است. افزایش راندمان مصرف انرژی و کاهش اتلاف ها با طراحی سیستم های بهینه بازیابی حرارتی محقق می گردد. با این نگرش اندیشمندان و محققان بر آن شدند که به بازیافت انرژی و ذخیره آن از جریان هایی که دارای انرژی بسیار بالایی هستند و بیهوده اتلاف می شوند روی آورند.

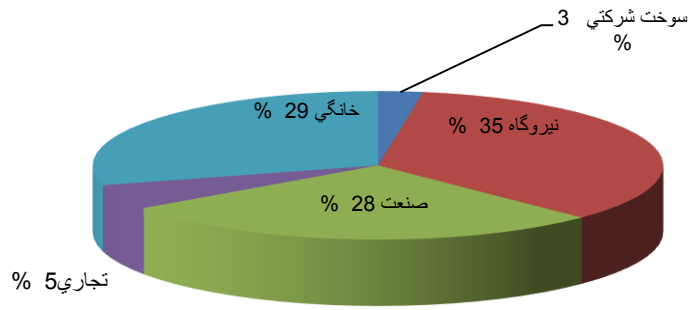
## ۱-۲ هدف از بازیافت انرژی

به طور کلی می توان هداف بازیافت انرژی را در چهار محور زیر بیان نمود:

### ۱-۲-۱ صرفه جویی در مصرف انرژی

صرفه جویی در مصرف انرژی می تواند با کاهش اتلاف انرژی و بالا بردن راندمان دستگاه های تولید کننده انرژی صورت پذیرد. با صرفه جویی در مصرف انرژی، منابع محدود کره ی زمین که دارای مواد سوختی

با کیفیت بالا می باشند دیرتر پایان یافته و می توان سوخت های فسیلی را در مصارف دیگری جز تولید انرژی مانند تهیه دارو، تولید مواد روغنی، مصارف مواد پتروشیمی و تهیه و تولید بسیاری از مواد سودمند دیگر مورد بهره برداری قرار داد[۱]. شکل (۱-۱) میزان مصرف انرژی در بخش های مختلف کشور را در سال ۱۳۸۹ را نشان می دهد.




شکل (۱-۱) میزان مصرف انرژی در بخش های مختلف کشور در سال ۱۳۸۹ [۲]

همان گونه که مشخص است قسمت عمده مصرف انرژی کشور در بخش های صنعت و نیروگاهی می باشد که متاسفانه بیشترین میزان اتلاف انرژی نیز بنا به دلایل مختلف در این بخش ها می باشد و لزوم هرچه بیشتر توجه به طرح هایی جهت صرفه جویی در مصرف انرژی در این بخش ها بیش از پیش روشن تر می باشد.

**۱-۲-۲ حل معضلات آلودگی های زیست محیطی**

توسعه اقتصادی به عنوان یک رکن اساسی در مجموعه سیاست های هر کشور مطرح می گردد و انرژی عامل اصلی و ضروری توسعه اقتصادی در هر جامعه ای می باشد. رشد روز افزون جمعیت و توسعه ی تکنولوژی های انرژی بر، وابستگی به انرژی و به تبع آن رشد مصرف انرژی به ویژه انرژی های فسیلی موجب افزایش مشکلات زیست محیطی می شود. به نحوی که بخش انرژی از مرحله ی تولید تا مصرف موجب نشر آلاینده های مختلف زیست محیطی می گردد.

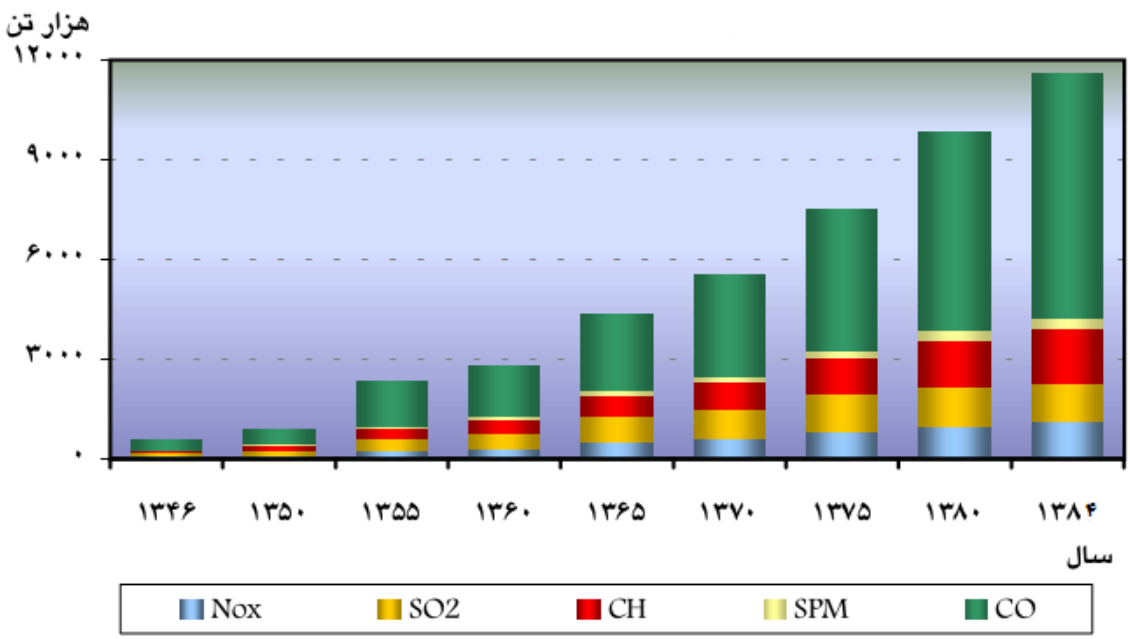
از مزایای بازیافت انرژی تا حدودی برطرف کردن معضلات آلودگی های زیست محیطی است که متاسفانه در حال حاضر جامعه ی جهانی با این معضل روبه رو بوده و شاهد مشکلات زیادی در این زمینه می باشد.

جدول (۱-۱) و شکل (۱-۲) میزان انتشار انواع آلاینده های ناشی از احتراق سوخت های فسیلی را نشان می دهد.

بر پایه گزارش های رسمی سال ۱۳۸۴ میزان انتشار گاز متان در ایران در بخش انرژی در حدود ۱۵۵,۹۱۱ هزار تن می باشد که ۸۰,۶۶۶ هزار تن آن در بخش فرایند های احتراقی انتشار می یابد .که این حجم از انتشار علاوه بر مشکلات زیست محیطی منجر به گرم تر شدن هوا نیز می گردد [۳].

جدول (۱-۱) درصد سهم فرایند های مختلف در میزان انتشار آلاینده ها در سال ۱۳۸۴ [۳]

| منبع | CO | NM VOC | $SO_2$ | NOx | $NH_3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| نیروگاه ها | ۱/۲۳ | ۰/۸۶ | ۵۰/۸۸ | ۱۸/۹۳ | ۰/۰۹ |
| سوخت صنعتی و غیره | ۱۸/۶۶ | ۳/۶۳ | ۲۳/۵۹ | ۱۳/۸۹ | ۰/۰۹ |
| فرایندهای تولید | ۵/۳۹ | ۵/۸۷ | ۳/۹۹ | ۱/۷۵ | ۲/۸۳ |
| تصفیه و توزیع سوخت | ۰/۲۳ | ۶/۰۰ | ۰/۲۲ | ۰/۸۸ | --- |
| مصرف حلال ها | --- | ۲۳/۵۶ | --- | --- | ۰/۰۶ |
| حمل و نقل | ۶۱/۴ | ۲۷/۹۷ | ۳/۳۴ | ۴۷/۳۷ | ۰/۹۶ |
| سایر منابع متحرک | ۷/۵۵ | ۵/۰۳ | ۱/۸۹ | ۱۵/۸۷ | --- |
| کشاورزی | ۰/۷۴ | ۱۷/۱۷ | --- | ۰/۲۹ | ۹۴/۶۵ |
| تصفیه و دفع فاضلاب | ۴/۶۶ | ۱/۲۸ | ۰/۵۸ | ۰/۸۴ | ۱/۰۹ |
| طبیعی | ۰/۲۱ | ۸/۶۴ | ۱۵/۵۰ | ۰/۱۷ | ۰/۲۳ |



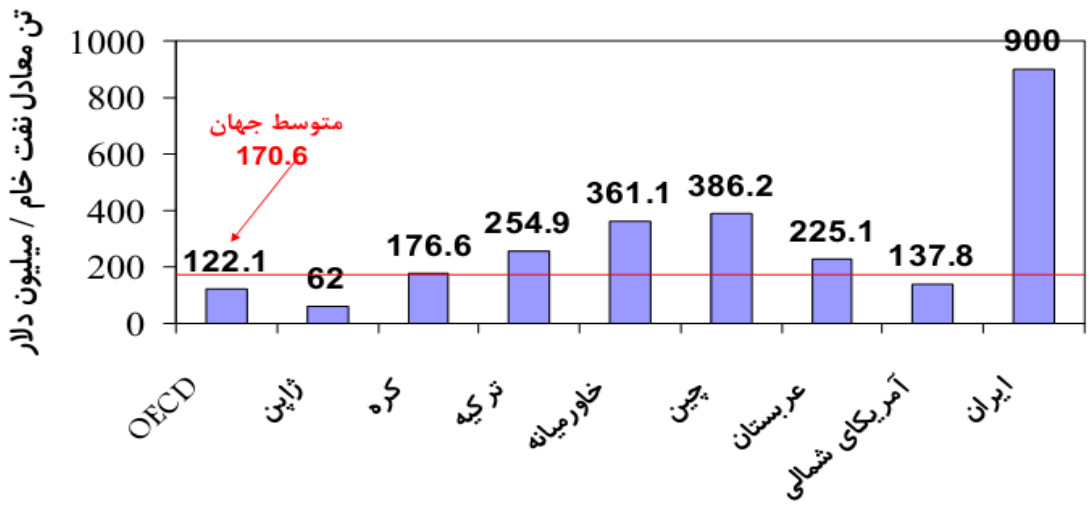

شکل (۱-۲) میزان انتشار انواع آلاینده های ناشی از احتراق سوخت های فسیلی [۳]

همان گونه که از اطلاعات موجود در این جدول و نمودار مشخص است مقدار انتشار آلاینده ها بسیار قابل ملاحظه بوده و رشد چشمگیری داشته است.

**۱-۲-۳ دلایل اقتصادی**

اگرچه ایران از غنی ترین منابع انرژی برخوردار است، اما تلف کردن و استفاده ی نادرست از آن ها خسارات جبران ناپذیری را به بودجه ی سالانه کشور تحمیل می کند که این هزینه معادل نیمی از بودجه عمرانی کشور بوده و سالانه حدود پنج میلیارد دلار تخمین زده می شود. در شکل(۱-۳) مقایسه میزان شدت مصرف انرژی در ایران با سایر کشور ها را در سال ۱۳۸۵ نشان می دهد که متاسفانه بیانگر این موضوع می باشد که کشور با مصرف بی رویه ی انرژی رو به رو می باشد [۲].

محدودیت منابع فسیلی، رشد بالای مصرف انرژی در ایران، خارج شدن کشورمان از جرگه ی صادر کنندگان نفت از اواخر دهه ی آینده و به تبع آن قطع درآمدها در صورت عدم برنامه ریزی صحیح در مدیریت انرژی کشور، توسعه ی کشور را به طور جدی تحت تاثیر قرار خواهد داد. عدم کارایی فنی و اقتصادی مصرف انرژی و هدر رفتن تقریب به یک سوم از کل انرژی در فرایندهای مصرف، ضرورت مدیریت انرژی و بالا بردن بازده و بهره وری انرژی را بیش از پیش آشکار می سازد. این موضوع رابطه ی مستقیمی با مشکلات زیست محیطی نیز دارد [۲].




شکل (۱-۳) مقایسه میزان شدت مصرف انرژی در ایران با سایر کشور ها در سال ۱۳۸۵ [۲]

تمام مسائل عنوان شده را می توان با بهره گیری از بازیافت انرژی بهبود بخشیده و مصرف انرژی را کاهش داده و همچنین هزینه و مخارج تولیدات را کاهش داد. به طور مثال با بهره گیری از سیستم بازیافت حرارت در کوره های سوخت فسیلی می توان مصرف انرژی را تا حدود پنجاه درصد کاهش داد[۴].

ñ

**۱-۲-٤ ذخیره و نگهداری از منابع ملی یک کشور**

هر کشوری با استفاده از منابع زیرزمینی خود در زمان کوتاهی با فقدان انرژی رو به رو خواهد شد و ناخود آگاه به اقتصاد ملی خود لطمه ی جبران ناپذیری وارد خواهد کرد. در جدول(۱-۲) مقدار رشد مصرف انرژی تا سال ۱۳۸۸ آمده است [۵].

همان طور که از جدول مشخص است با مصرف بی رویه انرژی در ایران رو به رو خواهیم بود در نتیجه باید چاره اندیشی کرد و با استفاده از راه حل های ممکن بر این مشکل فائق آمد و بهترین روش ممکن در حال حاضر جهت استفاده بهینه از مصرف انرژی، بازیافت انرژی در مراحل بعدی می باشد. بازیافت انرژی راه حلی مطمئن و موثر خواهد بود تا بتوان مدت زمان بیشتری از منابع ملی برخوردار بوده و انرژی را در اختیار نسل های بعدی این مرز و بوم قرار داد.

جدول (۱-۲) روند مصرف انرژی در ایران (میلیون بشکه معادل نفت خام) [۵]

| شرح | ۱۳۸۳ | ۱۳۸۴ | ۱۳۸۵ | ۱۳۸۶ | ۱۳۸۷ | ۱۳۸۸ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **مصرف نهایی** | | | | | | |
| ***فرآورده‌های نفتی*** | | | | | | |
| خانگی، عمومی و تجاری | ۸۸/۹ | ۹۱/۳ | ۹۰/۵ | ۹۲/۰ | ۸۲/۸ | ۷۵/۵ |
| صنعت | ۵۵/۲ | ۶۰/۶ | ۶۰/۷ | ۶۵/۰ | ۷۳/۰ | ۶۲/۵ |
| حمل و نقل | ۲۳۲/۵ | ۲۵۱/۳ | ۲۶۷/۰ | ۲۶۲/۶ | ۲۶۹/۸ | ۲۸۷/۳ |
| کشاورزی | ۲۳/۱ | ۲۴/۰ | ۲۶/۱ | ۲۶/۱ | ۲۷/۹ | ۲۸/۲ |
| مصارف غیرانرژی | ۳۰/۲ | ۳۵/۲ | ۵۱/۵ | ۷۰/۷ | ۷۹/۹ | ۸۲/۹ |
| کل مصرف فرآورده‌های نفتی | ۴۳۱/۰ | ۴۶۲/۶ | ۴۹۵/۹ | ۵۱۶/۲ | ۵۳۳/۵ | ۵۳۸/۵ |
| ***گازطبیعی*** | | | | | | |
| خانگی، عمومی و تجاری | ۲۱۴/۱ | ۲۲۵/۵ | ۲۶۳/۶ | ۲۸۹/۰ | ۲۷۷/۱ | ۲۹۶/۶ |
| صنعت | ۸۳/۰ | ۹۳/۶ | ۱۰۴/۷ | ۱۴۰/۳ | ۱۳۷/۳ | ۱۵۹/۰ |
| حمل و نقل | ۰/۵ | ۱/۹ | ۳/۳ | ۶/۶ | ۱۱/۶ | ۲۱/۷ |
| کشاورزی | – | – | ۰/۳ | ۱/۱ | ۱/۵ | ۲/۵ |
| مصارف غیرانرژی | ۲۲/۵ | ۲۳/۰ | ۲۷/۲ | ۳۴/۱ | ۳۷/۷ | ۳۹/۱ |
| کل مصرف گازطبیعی | ۳۲۰/۳ | ۳۴۴/۱ | ۳۹۹/۱ | ۴۷۱/۰ | ۴۷۵/۲ | ۵۱۹/۷ |
| ***زغال‌سنگ*** | | | | | | |
| خانگی، عمومی و تجاری | ۰/۰۷ | ۰/۰۷ | ۰/۰۷ | ۰/۰۷ | ۰/۰۷ | ۰/۰۷ |
| صنعت | ۰/۳ | ۰/۳ | ۰/۳ | ۰/۳ | ۰/۳ | ۰/۲ |
| مصارف غیرانرژی | ۲/۹ | ۴/۳ | ۳/۸ | ۴/۲ | ۲/۵ | ۱/۵ |
| کل مصرف زغال‌سنگ | ۳/۲ | ۴/۶ | ۴/۲ | ۴/۶ | ۲/۹ | ۱/۸ |
| ***منابع تجدیدپذیر قابل احتراق*** | | | | | | |
| خانگی، عمومی و تجاری | ۱/۵ | (۲) ۱۱/۸ | (۲) ۱۱/۸ | (۲) ۵/۶ | (۲) ۵/۶ | (۲،۱) ۵/۶ |
| کل مصرف منابع تجدیدپذیر قابل احتراق | ۱/۵ | ۱۱/۸ | ۱۱/۸ | ۵/۶ | ۵/۶ | ۵/۶ |
| ***برق*** | | | | | | |
| خانگی، عمومی و تجاری | ۳۷/۳ | ۴۰/۶ | ۴۴/۵ | ۴۷/۳ | ۴۹/۳ | ۵۲/۰ |
| صنعت | ۲۶/۵ | ۲۶/۸ | ۲۸/۶ | ۳۰/۵ | ۳۲/۲ | ۳۳/۸ |
| حمل و نقل | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۰/۰۸ | ۰/۱۰ | ۰/۱۴ | ۰/۱۷ |
| کشاورزی | ۹/۱ | ۹/۷ | ۱۰/۲ | ۱۰/۲ | ۱۲/۵ | ۱۲/۶ |
| سایر مصارف | ۳/۱ | ۲/۵ | ۲/۷ | ۲/۷ | ۲/۳ | ۲/۲ |
| کل مصرف برق | ۷۶/۰ | ۷۹/۷ | ۸۶/۳ | ۹۰/۹ | ۹۶/۶ | ۱۰۰/۸ |
| **کل مصرف نهایی** | ۸۳۲/۰ | ۹۰۲/۷ | ۹۹۷/۳ | ۱۰۸۸/۲ | ۱۱۱۳/۸ | ۱۱۶۶/۲ |
| **کل مصرف نهایی انرژی** | ۷۷۶/۲ | ۸۴۰/۱ | ۹۱۲/۷ | ۹۷۹/۲ | ۹۹۳/۷ | ۱۰۴۲/۰ |
| **کل مصرف نهایی غیر انرژی** | ۵۵/۶ | ۶۲/۶ | ۸۲/۵ | ۱۰۹/۰ | ۱۲۰/۱ | ۱۲۴/۲ |

ñ

با توجه به ذکر دلایل مطرح شده، بازیافت انرژی در هر سیستمی مورد نیاز بوده اما باید توجه داشت که بازیافت انرژی در هر بخشی مقرون به صرفه نیست و کاربرد ندارد و زمانی اجرای آن ضروری خواهد بود که:

۱) بازیافت انرژی باید در قسمتی از تاسیسات صورت گیرد که از انرژی به دست آمده بتوان در قسمتی دیگر از تاسیسات استفاده کرد زیرا اگر انرژی حاصله مصرفی نداشته باشد کار انجام شده بیهوده می باشد.

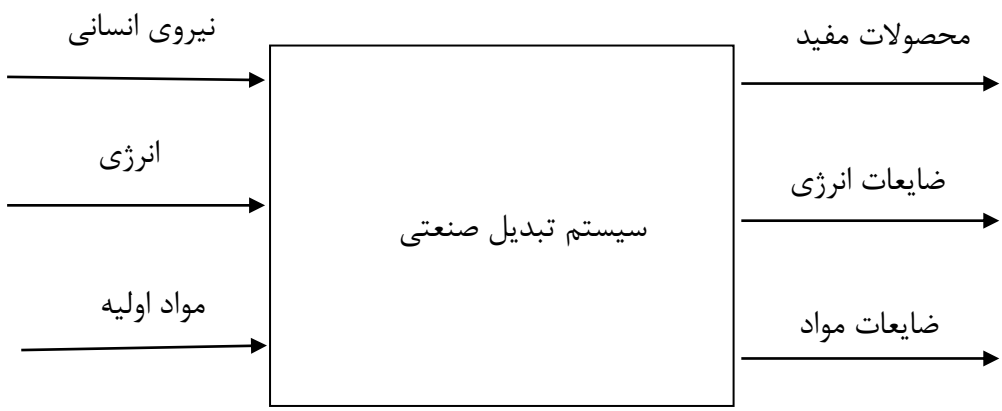
۲) بازیافت انرژی باید به مقدار کافی و شرایط مناسب انجام گیرد تا بتوان از آن در مقاصد مورد نیاز استفاده کرد.

۳) گرمای بازیافت شده از جریانی که گرمای آن به هدر می رود باید به فرایندی که به گرما نیاز دارد منتقل گردد. این انتقال گرما باید با توجه به بررسی مشکلات موجود در فرایند مورد بررسی اقتصادی قرار گیرد.

۴) فرایند طراحی شده برای مصرف انرژی بازیافت شده باید از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گیردتا در زمان کوتاه سودآوری لازم را داشته باشد. به طور مثال مدت زمان بازگشت سرمایه در طرح های بازیافت حرارت در کوره های سوخت فسیلی دو تا پنج سال برآورد می شود[۴] .

**۱-۳ بازیافت انرژی در صنعت:**

تمام تاسیسات یک واحد صنعتی در ارتباط با هم می باشند. با توجه به وظایف هر واحد صنعتی به منظور سود دهی بیشتر، تمام واحدهای تاسیسات مورد بهینه سازی قرار می گیرند. مطابق شکل (۱-۴) یک فرایند تبدیل صنعتی به مانند یک سیستم فیزیکی در نظر گرفته شده است. واضح است که ورودی های این سیستم شامل نیروی انسانی، مواد خام صنعتی و مصارف انرژی بوده و در مقابل، خروجی های سیستم شامل درآمد حاصله از فروش محصولات، انرژی تلف شده و به مصرف نرسیده و مواد تلف شده و به هدر رفته (ضایعات) می باشد [۱].




شکل (۱-۴) سیستم تبدیل صنعتی [۱]

پس بدیهی و روشن است برای افزایش سودآوری تا حد ممکن باید هزینه های مواد ورودی به منظور کاهش هزینه های تولید مواد و بازیافت انرژی و مواد و بازگشت آن از خروجی واحد به ورودی سیستم، بهینه سازی واحد را انجام داد.

واضح است با بازیافت انرژی و برگشت آن به سیستم هزینه مصرفی کاهش پیدا کرده و سودآوری واحد صورت می پذیرد. در گذشته به دلیل پایین بودن قیمت انرژی و در دسترس بودن آن توجه لازم به هزینه مصرف انرژی صورت نمی پذیرفت. اما امروز با گذشت زمان به دلیل بالا بودن قیمت انرژی و کمیاب شدن آن و ذکر این نکته که در کشور ما نیز با توجه به اجرای طرح هدفمندی یارانه ها که مهمترین تاثیر آن بر قیمت انرژی در واحد های صنعتی و از عوامل موثر در قیمت تمام شده محصول نهایی می باشد، لزوم هر چه بیشتر توجه به بازیافت انرژی را در واحدهای صنعتی کشور که از بهره وری پایین مصرف انرژی در واحدهای صنعتی خود رنج می برد بیش از پیش آشکار می سازد.

به طور کلی می توان مواد تلف شده در فرایندهای صنعتی را به دو دسته تقسیم نمود:

الف) مواد تلف شده مشخص[۱]

به موادی اطلاق می گردد که پس از انجام یک فرایند مشخص تولید شده و ترکیب آن ها در طول انجام فرایند تقریباً ثابت و بدون تغییر می ماند. این فرایندها می توانند در زمره فرایندهای تولید یک ماده قرار گیرند مانند تولید منسوجات و یا فرایندهای تصفیه مواد دور ریز [۱].

ب) مواد تلف شده نامشخص[۲]

اساساً شامل فضولات خانگی و صنعتی می شود و ترکیب آن ها متغیر بوده در نتیجه تمام ذرات سمی منتشر شده در هوا، تمام مواد مضر در آب های آلوده و هرگونه ترکیباتی که اجزای آن متغیر باشد جزء این دسته به شمار می رود [۱].

### ۱-٤ عوامل موثر در انتخاب روش بازیافت انرژی

اعمال کاهش مصرف انرژی و ذخیره انرژی به روش های متعددی امکان پذیر می باشد. عوامل موثر در انتخاب یکی از این روش ها به شرح زیر می باشد [۱]:

۱-هزینه های ثابت که شامل هزینه های مصارف سوختی نیز می شود؛

۲- هزینه تعمیرات و عملیات دستگاه های به کار گرفته شده؛

۳- تکنولوژی فرایند به کار گرفته شده؛

۴-اعتبار تجهیزات و امکانات؛

---

[۱] Specific Wasted

[۲] Non-Specific Wasted

۵- دسترسی به مواد سوختی؛

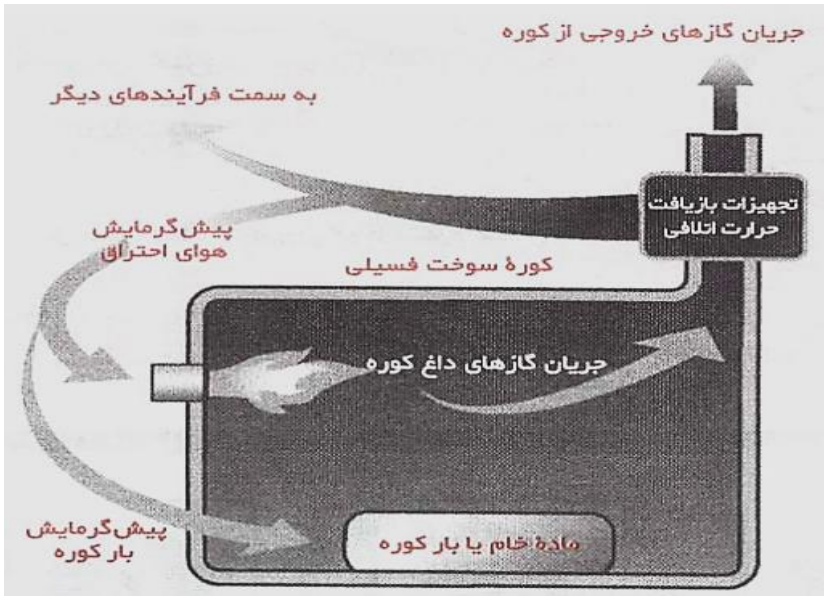
۶- تامین نیروی انسانی؛

۷- تامین مکان برای استقرار تجهیزات؛

عوامل بالا نقش تعیین کننده ای در انتخاب روش بازیافت انرژی دارند. با محاسبات مهندسی و بررسی مسایل اقتصادی روشی که مقرون به صرفه بوده و با صرف هزینه کمتر بازیافت انرژی بیشتری در آن صورت گیرد انتخاب می شود.

### ۱-۵ انتخاب طرح بازیافت انرژی

بررسی و به کار گیری تمام طرح های بازیافت حرارتی مستلزم وجود یک منبع یا چشمه ی حرارتی[۱] و یک نقطه مصرف یا چاه حرارتی[۲] می باشد (شکل ۱-۵).




شکل(۱-۵) طرح بازیافت حرارتی از کوره [۴]

بهترین طرح های بازیافت حرارت از لحاظ راندمان یا بازده ی عملکرد، طرح هایی هستند که بتوانند تعادل متناظری بین موارد زیر به صورت همزمان برقرار کنند [۱]:

۱-دمای سیالی که بازیافت انرژی از آن انجام می گیرد؛

۲- سرعت سیالی که بازیافت انرژی از آن صورت می گیرد؛

۳- ترکیب شیمیایی سیالی که بازیافت انرژی از آن صورت می گیرد؛

---

[۱] Heat Source
[۲] Heat Sink

۴- کم ترین دمای مجازی که سیال سرد شده می تواند داشته باشد؛
۵- ترکیب شیمیایی سیالی که گرم می شود؛
۶- بیشترین دمای مجازی که سیال گرم شده می تواند داشته باشد؛
۷- دمای کنترل شده ی سیستم اگر کنترل لازم باشد؛
۸- زمان دستیابی به حرارت اتلافی؛

یکی از موارد مهم ذکر شده در بالا درجه حرارت منابع تولید کننده ی حرارت اتلافی می باشد. درصنعت منابع تولید کننده حرارت اصولاً به صورت جریان های گاز داغ می باشند. منابع تولید کننده انرژی های تلف شده بر حسب درجه حرارت جریان گاز را می توان به سه دسته ی زیر تقسیم نمود:

**۱-۵-۱ منابع گرمایی با دمای بالا**

جریان گازهایی که درجه حرارت بالایی دارند و محدوده دمای آن ها بین $^{\circ}C$ ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ می باشد. از این منابع می توان مستقیماً در فرایندهای خشک کردن و یا تولید بخار استفاده کرد. جدول (۱-۳) تاسیساتی که گازهای با دمای بالا تولید می کنند را نشان می دهد.

جدول (۱-۳) منابع گرمایی با دمای بالا [۱]

| نوع تاسیسات | دما $^{\circ}C$ |
|---|---|
| کوره های تصفیه نیکل | ۱۳۰۰-۱۶۰۰ |
| کوره های تصفیه آلومینیوم | ۷۰۰-۱۰۰۰ |
| کوره های تصفیه روی | ۸۰۰-۱۲۰۰ |
| کوره های تصفیه مس | ۸۰۰-۹۰۰ |
| کوره های حرارتی تهیه فولاد | ۸۰۰-۱۰۰۰ |
| کوره های ذوب سنگ معدن شیشه | ۱۰۰۰-۱۵۰۰ |
| تاسیسات تولید هیدروژن | ۷۰۰-۱۰۰۰ |
| کوره های تولید سیمان | ۶۰۰-۱۲۰۰ |
| کوره های سوزاندن فضولات | ۷۰۰-۱۰۰۰ |

**۱-۵-۲ منابع گرمایی با دمای متوسط**

جریان گازهایی که درجه حرارت متوسطی دارند محدوده دمایی آن ها بین $^{\circ}C$ ۲۵۰ تا ۶۰۰ می باشد. از این منابع می توان به عنوان کار مکانیکی در تاسیسات صنعتی مانند توربین های گازی و همچنین جهت تولید

بخار با فشار بالا و سیستم های گرمایشی استفاده نمود. جدول(۱-۴) تاسیساتی که گازهای با گرمای اتلاف شده در دمای متوسط تولید می کنند را نشان می دهد.

جدول (۱-۴) منابع گرمایی با دمای متوسط [۱]

| نوع تاسیسات | دما °C |
|---|---|
| گازهای احتراق خروجی از بویلرها | ۱۸۰-۵۰۰ |
| گازهای احتراق خروجی از توربین های گازی | ۴۰۰-۶۰۰ |
| گازهای احتراق خروجی از کوره های تولید گرما | ۵۰۰-۷۰۰ |
| اجاق های پخت و خشک کردن | ۲۵۰-۶۰۰ |
| کراکینگ های کاتالیستی | ۵۰۰-۷۰۰ |

**۱-۵-۳ منابع گرمایی با دمای پایین**

جریان گازهایی که درجه حرارت پایینی دارند محدوده دمایی آن ها بین ۵۰ °C تا ۲۵۰ می باشد که می توان جهت گرم کردن مایعات و یا جامدات ورودی به فرایندها از آن استفاده نمود. در جدول (۱-۵) تاسیساتی که تولید کننده ی این منابع گرمایی با دمای پایین می باشند درج شده است.

جدول (۱-۵) منابع گرمایی با دمای پایین [۱]

| نوع تاسیسات | دما °C |
|---|---|
| گازهای خروجی در فرایند مایع کردن بخار آب های مصرف شده در خنک کردن: | ۷۰-۱۵۰ |
| درب های کوره | ۵۰-۷۰ |
| یاتاقان ها | ۵۰-۱۰۰ |
| کمپرسور های هوا | ۴۰-۷۰ |
| پمپ ها | ۴۰-۱۰۰ |
| مایعاتی که در فرایند های داغ بدست می آیند | ۵۰-۱۶۰ |