

## انرژی و آموزش ترموآکونومیک و کاربرد آن در مهندسی

محمود یعقوبی و ابوالحسن مختاری

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی

**چکیده:** افزایش رشد تقاضای انرژی در قرن ۲۱ همراه با مشکلاتی از قبیل آلودگی محیط زیست، کمبود منابع طبیعی و همچنین محدودیت فضا و مکان مناسب برای احداث نیروگاههای سوخت فسیلی است. از طرف دیگر، رشد فناوری در جهان تقاضا برای انرژی به خصوص انرژی الکتریکی رشد چشمگیری یافته است. از این نظر، یافتن انرژیهای پاک جایگزین، عوامل ایجاد بازگشت ناپذیری در سیستمهای مصرف کننده انرژی و مصرف بهینه انرژی با روش تحلیل انرژی امری ضروری می‌نماید. یکی از کاربردهای انرژی تحلیل اقتصادی سیستم‌هاست. این قسمت از تحلیل انرژی در دوره‌های کارشناسی رشته‌های مهندسی در کشور ما تدریس و آموزش داده نمی‌شود. در تحلیل انرژی - اقتصادی، برای بهبود طراحی سیستم‌ها انرژی با مفاهیم اقتصادی ترکیب می‌شود و با حداقل کردن قیمت و زمان کارکرد سیستم‌ها می‌توان بهترین و کارآمدترین سیستم را با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی شناسایی کرد. در این مطالعه ضمن اشاره به میزان مصرف انرژی در جهان، لزوم جایگزینی انرژیهای فسیلی با انرژیهای پاک تجدید پذیر و آموزش تحلیل‌های فنی اقتصادی در دانشگاه‌های کشور بیان شده و با کاربرد روش قیمت انرژی تولیدی، نتیجه حاصل از اعمال این روش روی سیکل نیروگاه خورشیدی شیراز و همچنین، نتایج موجود از اعمال این روش بر روی سیستم ترکیبی تولید توان و حرارت همزمان مطالعه و درسی با عنوان "طراحی سیستم‌های گرمایی" پیشنهاد شده است.

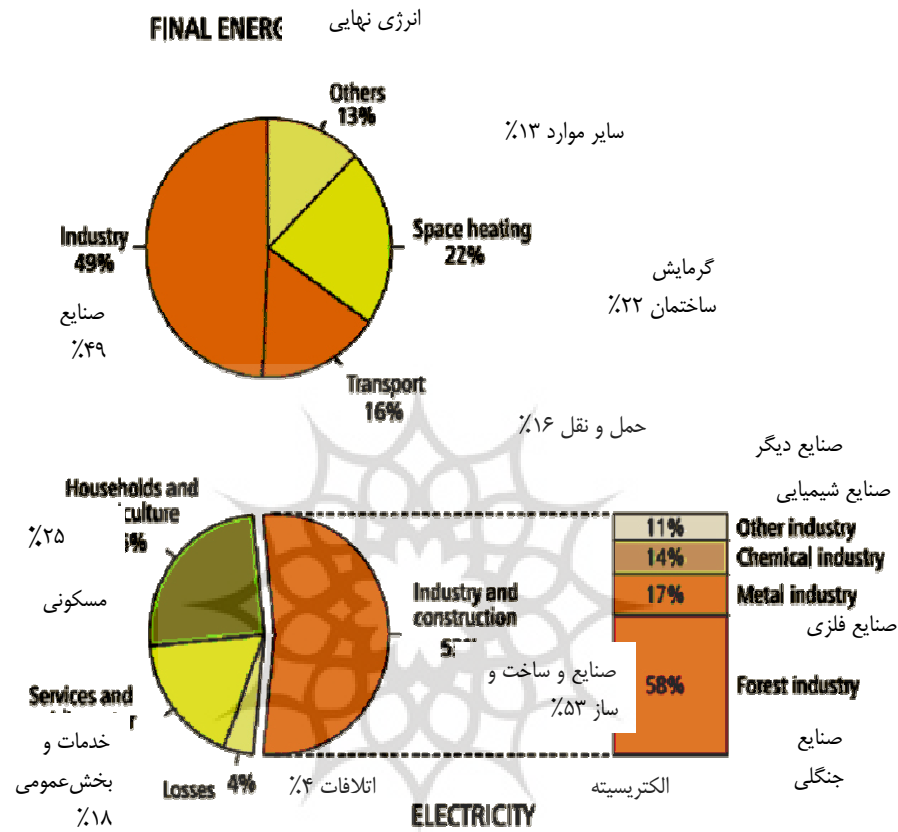
واژه‌های کلیدی: انرژیهای تجدیدپذیر، قانون دوم ترمودینامیک، تحلیل انرژی - اقتصادی و قیمت انرژی تولیدی.

## ۱. مقدمه

گسترش روز افزون وابستگی بخشهای مختلف اقتصادی به انرژی این قابلیت را نشان می‌دهد. که انرژی به عنوان عاملی مهم و مؤثر در فرایند تولید و رشد اقتصادی مطرح باشد [۱]. شکل ۱ سهم مصرف انرژی بخشهای مختلف در حالت کلی و همچنین، مصرف انرژی الکتریکی آن بخشها را به تفکیک در سال ۲۰۰۳ در جهان نشان می‌دهد [۲]. طی ۲۵ سال آینده نیاز انرژی جهان در حدود ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که در قرن ۲۱ میلادی منابع انرژی فسیلی؛ یعنی سوختهای زغال سنگ و نفت رو به اتمام خواهد بود. طی ۲۰ تا ۳۰ سال آینده (۲۰۲۵-۲۰۳۵) مصرف انرژی اولیه جهان همچنان از منابع نفت و گاز و زغال سنگ تأمین خواهد شد [۳]، ولی مسلماً با افزایش چشمگیر قیمت سوختهای فسیلی و مصرف روز افزون سوختهای فسیلی به عنوان منابع محدود انرژی و تاثیر سوء آن بر محیط زیست توجه جهانیان به استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر بیشتر خواهد شد. فناوری بهره برداری از انرژیهای تجدیدپذیر، بحثهای آلودگی محیط زیست و ذخیره سازی سوختهای فسیلی از جمله عوامل مهمی هستند که خوشبختانه باعث شده در کشور ما نیز در سالهای اخیر به منابع انرژیهای تجدیدپذیر توجه خاصی معطوف شود.

چوب، زغال سنگ، نفت سفید، نفت گاز، مازوت، گاز، انرژی آبی، انرژی هسته‌ای، انرژی باد و در نهایت، انرژی خورشیدی مهم ترین منابع شناخته شده برای تامین انرژی هستند. انرژیهای آبی، بادی و خورشیدی در زمره انرژیهای پاک قرار دارند. نظر به اهمیت انرژیهای پاک، نگرش کشورها برای دستیابی بر روی این نوع انرژیها متمرکز شده است. با توجه به شکل ۱ ضروری است تا بحث اهمیت انرژی، آلودگی ناشی از مصرف انرژی و سرمایه‌گذاری برای پژوهش و دستیابی به منابع جدید به نحوی در آموزش مهندسی در کلیه رشته‌ها منظور شود تا کلیه فارغ التحصیلان مهندسی بدانند سهم انرژی در فرایندهای صنعتی با چه چالشهایی در آینده روبه رو خواهد بود.

در دهه اخیر، شاهد هستیم که مجموعه انرژیهای تجدیدپذیر روز به روز سهم بیشتری را در سیستم تأمین انرژی جهان به عهده می‌گیرند. لذا، در برنامه‌های آموزشی، پژوهشی، آینده نگری و سیاستگذاریهای انرژی بین‌المللی باید نقش مهمی برای منابع تجدید پذیر انرژی در نظر گرفته شود.



شکل ۱: سهم مصرف انرژی جهان در بخشهای مختلف در حالت کلی و همچنین، مصرف انرژی الکتریکی آن بخشها به تفکیک در سال ۲۰۰۳ [۲]

## ۲. مزایای استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر [۴]:

برای سیستمهای تجدید پذیر مزایای زیادی را برشمرده‌اند. با توجه به رو به پایان بودن انرژیهای فسیلی، افزایش قیمت آنها، تغییر کاربری آنها با ارزش افزوده بیشتر و همچنین، آلوده ساز بودن این گونه انرژیها می‌توان برای انرژیهای تجدید پذیر مزایای زیر را برشمرد:

- سیستم هایی که از انرژیهای تجدیدپذیر استفاده می کنند به هیچ عنوان گازهای آلاینده و مضر برای اتمسفر تولید نمی کنند؛
- انرژیهای تجدیدپذیر مانند انرژی هسته ای زباله های مشکل آفرین تولید نمی کنند؛
- این نوع انرژیها پایان ناپذیرند؛
- با استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر تولید دی اکسیدکربن بسیار کاهش خواهد یافت [۵]؛
- انرژیهای تجدیدپذیر را به طور منطقه ای و محلی می توان تولید و استفاده کرد؛
- بهره گیری از این انرژیها باعث قطع وابستگی می شوند؛
- به کارگیری این نوع انرژیها به یک کشور فرصت امکان توسعه و فناوری استفاده از تمام انرژیها را فراهم می کند؛
- استفاده از این انرژیها باعث رشد سطح زندگی جوامع کوچک (مناطق دور دست) و افزایش نوع انرژیهای تولیدی در کشور می شود؛
- روند رشد مالیات انرژی<sup>۱</sup> و دیگر مالیاتهای مربوط به مسائل زیست محیطی بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۳ تقریباً ۵ برابر شده است [۲]. لذا، مالیات بر بخشهایی که آلودگی بیشتری تولید می کنند به عنوان مالیات انرژی به تدریج افزوده می شود تا مصرف و تولید آلودگی از انرژی کاهش یابد.

معرفی و آموزش انرژیهای جایگزین و مطالعه و تحقیق در زمینه امکان استفاده و بهره برداری از آنها با توجه به ملاحظات فنی - اقتصادی و منابع گسترده موجود در ایران و همچنین، به دلیل روند رو به رشد مصرف سوختهای مایع هیدروکربنی در کشور که هر ساله موجب ضرر و زیان هنگفت به بودجه عمومی و محیط زیست کشور می شود، اهمیت چشمگیری یافته است. متأسفانه، بحث اقتصاد انرژی و در نظر گرفتن اقتصاد در کنار ماهیت ترمودینامیکی پدیده های مورد مطالعه در صنعت، هنوز آنچنان که باید در دانشگاههای کشور در گروه های مهندسی مکانیک و مهندسی شیمی تدریس نمی شود [۶] و در مواردی به صورت پروژه و گذرا به آن پرداخته شده است. این در حالی است که مبحث ترمواکونومیک در دانشگاههای معتبر دنیا به صورت جداگانه و به عنوان یک مبحث مجزا به دانشجویان

مهندسی مکانیک تدریس می شود و در مواردی نیز ترمودینامیک جزئی از درس طراحی سیستم‌های حرارتی و بهینه سازی به شمار می‌رود [۷ و ۸]. از آنجا که به دست آوردن شرایط بهینه کارکرد با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی هر سیستم به تدریج ارزش بیشتری پیدا می‌کند، مطالعه تحلیلی و آماری از مصرف جهانی انرژی و آموزش استفاده از مطالعات ترمودینامیک در سیستم‌های ترمودینامیکی از جمله سیستم‌های استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر به منظور فراهم شدن تا شرایط بهینه برای عملکرد سیستم از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی، بسیار مهم و ضروری است. از اهداف مهم رشته مهندسی مکانیک حرارت سیالات در کشور کسب تواناییهای طراحی و محاسبه اجزای مجموعه‌هایی است که اساس کار آنها مبتنی بر تبدیل انرژی و انتقال حرارت و جرم است. آموزش در این بخش به نحوی است که دانش آموختگان آمادگی کار در صنایع مختلف مهندسی مکانیک در زمینه حرارت و سیالات نظیر نیروگاهها، پالایشگاهها، تأسیسات پتروشیمی و گاز، واحدهای طراحی و بهره برداری موتورهای احتراق داخلی، توربینهای گاز و موتور جت و تأسیسات حرارتی و برودتی را داشته باشند و مسئولیت طراحی و محاسبات طرحها را عهده‌دار شوند [۹]. لذا، می‌توان در ابتدای امر بحث ترمودینامیک یا همان ملاحظات فنی - اقتصادی سیستم های ترمودینامیکی را به عنوان یک فصل جداگانه‌ای در مبحث ترمودینامیک رشته‌های مهندسی به خصوص مهندسی مکانیک و مهندسی شیمی گنجانند.

### ۳. نگاهی به آمار مصرف جهانی انرژی و اهمیت بحث ترمودینامیک

در حال حاضر، ۶۱ درصد از کل الکتریسیته جهان و ۸۰ درصد از انرژیهای تجاری در دنیا از سوختهای فسیلی تجدید ناپذیر به دست می‌آید که در تأمین انرژی گرمایشی، حمل و نقل، روشنایی و تولید سایر محصولات صنعتی به کار می‌روند. آمارها نشان می‌دهند که تجهیزات خورشیدی تولید کننده برق در سال ۱۹۹۹ میلادی ۲۰۰ مگاوات، در سال ۲۰۰۰ میلادی ۲۸۰ مگاوات، در سال ۲۰۰۱ میلادی ۳۴۰ مگاوات و در سال ۲۰۰۲ میلادی ۴۲۷ مگاوات بوده است [۱۰]. در همین سال تولیدات منابع انرژی تجدیدپذیر ۱۳ درصد از انرژی جهان را به خود اختصاص داده اند که در این بین سهم انرژی خورشیدی در تأمین انرژیهای مورد نیاز جهان فقط یک درصد از کل انرژیهای تجدیدپذیر است. خوشبختانه، در طی ۲۰ سال اخیر نرخ رشد تقاضا برای انرژی خورشیدی به طور ثابت ۲۰ تا ۲۵ درصد در سال بوده و در طول

این سالها قیمت تمام شده برق تولیدی و قیمت خود تجهیزات نیز کاهش یافته است که علت این امر را می‌توان بهبود فناوری تولید و توجیه اقتصادی آن دانست [۱۱].

در باره کشور ایران، وضعیت جغرافیایی آن به گونه‌ای است که بین عرضهای جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه قرار گرفته است و میزان تابش برون زمینی خورشیدی بر سطح افق بین ۳۰۰ تا ۹۵۰ کالری بر سانتیمتر مربع در طول روز تغییر می‌کند. با مقایسه انرژی خورشیدی با سوخته‌های فسیلی با توجه به وسعت کشورمان و میزان کل انرژی خورشیدی سالانه در ایران که در حدود ۱۰۱۶ مگاژول است [۱۲]، این مقدار از نظر معادل سوخته‌های فسیلی برابر ۱۶۰۰ میلیارد بشکه نفت خام است و از نظر مقدار تقاضای انرژی سالیانه در کشور مقدار چشمگیری را نشان می‌دهد. با صرفه جویی منابع انرژی سوختی و به کارگیری در دیگر صنایع از نظر اقتصادی درآمد زیادی از این صنایع نصیب کشور خواهد شد. با توجه به اهمیت بهینه سازی و بهره برداری مؤثر از انرژیهای خدادادی و وجود آلودگیهای زیست محیطی ناشی از مصرف سوخته‌های فسیلی در بخش تولید انرژی، لزوم کاربرد انرژیهای تجدید پذیر در تولید انرژی احساس می‌شود [۱۳]. انتظار می‌رود که این منابع در بلند مدت نقش مهمی در تأمین انرژی جهان ایفا کنند و جانشین خوبی برای سوخته‌های فسیلی باشند. از این رو، توجیه اقتصادی و ایجاد نسل جدید نیروگاههایی که انرژی آنها فسیلی نباشد بلکه از انرژیهای تجدید پذیر باشد، اهمیت خاصی دارد. با اعمال قوانین اقتصادی و داخل کردن اقتصاد در بحث فنی و مهندسی تأمین انرژی یا همان بررسی ترموآکونومیک طرحهای اجرایی می‌توان شرایط کارکرد تجهیزات به کار رفته در طرح را طوری مشخص کرد که قیمت تمام شده تولید به حداقل ممکن برسد. لذا، در آموزش اصول موجود در ترمودینامیک کلاسیک لزوم مطالعه ترموآکونومیک برای سیستم‌های حرارتی از جمله سیستم‌های حرارتی خورشیدی در رشته‌های مهندسی مکانیک و مهندسی شیمی می‌تواند در طراحی سیستم‌های جدید و در آگاهی و تصمیم‌گیریهایی صنعتی توسط این دسته از مهندسان بسیار مفید و متناسب با شرایط جدید فناوری باشد. هدف از ارائه مبحث ترموآکونومیک برای دانشجویان مهندسی را می‌توان فهم هر چه بیشتر کاربرد تحلیل انرژی در سیستم‌های انرژی، شناخت منابع و مصارف انرژی و انرژی در یک سیستم، برآورد راندمان و بهینه سازی سیستم با توجه به مسائل اقتصادی طرح عنوان کرد [۱۴]. برای نمونه جایگاه مبحث ترموآکونومیک در آموزش مهندسی برای برخی دانشگاه‌های آسیا و آمریکا در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: جایگاه آموزش ترموآکونومیک در مهندسی برای برخی دانشگاههای جهان

مرجع	جایگاه ترموآکونومیک در سیستم آموزشی	رتبه جهانی دانشگاه	نام دانشگاه
[۷]	به عنوان یک فصل از درس Thermal design and optimization تدریس می شود.	۱۳۷۹	نیو برانزویک (کانادا)
[۱۴]	به عنوان یک درس جداگانه با عنوان Thermo-economic analysis and optimization تدریس می شود.	۵۷۴	ساندیاگو (امریکا)
[۸]	به عنوان یک فصل از درس Thermal system analysis and design تدریس می شود.	۱۱۷	نیو مکزیکو (امریکا)
[۱۵]	به عنوان یک فصل از درس Applied thermal engineering تدریس می شود.	۵۹	توکیو (ژاپن)
[۱۶]	به عنوان یک درس جداگانه در آزمایشگاه ارائه می شود. Laboratory for the Thermal Management of Electronics	۱۲	مینیسوتا (امریکا)

#### ۴. قانون دوم ترمودینامیک

قانون دوم ترمودینامیک برای سیستم بسته به صورت زیر بیان می شود:

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \leq S_2 - S_1$$

در معادله بالا S انتروپی سیستم و T دمای مرز سیستم در محل انتقال حرارت به سیستم است. انتروپی به عنوان یک مفهوم ترمودینامیکی تفاوت بین انتقال حرارت و انتقال کار را که هر دو شکلی از انرژی هستند، بیان می کند و در واقع، بیانگر این نکته است که تنها انتقال حرارت منجر به انتقال انتروپی می شود و انتقال کار با انتقال انتروپی سیستم همراه نیست. همان طور که گفته شد، قانون دوم به صورت نامساوی بیان می شود که این نامساوی با تعریف مفهوم S<sub>gen</sub>، انتروپی تولید شده در فرایند، به صورت مساوی در می آید.

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$$

در واقع، قانون دوم بیان می‌کند که هر فرایند ترمودینامیکی با تولید انترپی همراه است. باید توجه داشت که انترپی تولید شده به مسیر فرایند بستگی دارد و یک خاصیت سیستم به شمار نمی‌آید.

بر خلاف قانون دوم که به مسیر فرایند و امکان وقوع آن می‌پردازد، قانون اول ترمودینامیک مبین بقای انرژی اعمالی بر فرایندهای چرخه‌ای<sup>۱</sup> است و بر برابری کار و حرارت تأکید دارد. فرض قانون اول بر آن است که فرایند به صورت چرخه‌ای صورت پذیر باشد، در صورتی که به طور طبیعی فرایندهایی را می‌توان در نظر گرفت که اجرای آنها به صورت چرخه‌ای امکان پذیر نیست، پس می‌توان گفت که تنها اعمال قانون اول ترمودینامیک برای یک فرایند مبین صحت در اجرای آن فرایند نیست و قانون اول در بیان محدودیت‌های اجرای فرایندهای ترمودینامیکی دارای نقص است یا اصلاً محدودیتی ایجاد نمی‌کند [۱۷ و ۱۸]. از طرف دیگر، در قانون اول ترمودینامیک صحبت از تبدیل مقداری انرژی از نوعی به نوع دیگر است و تمام توجه بر مقدار و کمیت انرژی است و در این میان، هیچ توجهی به تغییر کیفیت انرژی نمی‌شود، در صورتی که کیفیت انرژی و تغییر کیفیت انرژی در تحلیل سیستم‌های ترمودینامیکی اهمیت بسیار زیادی از نظر کارایی و بهره‌وری دارد.

## ۵. انرژی

تحلیل انرژی که بررسی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک است، در رأس تحقیقات دو دهه اخیر قرار دارد. این تحلیل در اوایل دهه ۷۰ میلادی با شروع بحران انرژی در جهان با داشتن برتری نسبت به تحلیل انرژی و روشهای دیگر در به دست آوردن کارایی سیستم‌های انرژی به دلیل توانایی در یافتن بازگشت ناپذیریهای موجود در سیستم و در نظر داشتن کیفیت انرژی به طور قابل توجهی مورد استفاده قرار گرفت [۱۹]. به طور مشروح در تمام کتب نوشته شده در زمینه ترمودینامیک و سیستم‌های انرژی، استفاده از تحلیل انرژی در تحلیل و توسعه و طراحی سیستم‌های ترمودینامیکی و حرارتی لازم و ضروری شمرده شده و تنها تحلیل انرژی در توانایی شناخت و تحلیل بازگشت ناپذیریهای خاص در سیستم معرفی می‌شود [۲۰].



اگرژی مبین کیفیت انرژی است که به نوع انرژی بستگی دارد. برخی اگرژی را بخش قابل تبدیل انرژی می دانند و انرژی را به صورت زیر تعریف کرده اند [۲۱]:

$$\text{انرژی} + \text{اگرژی} = \text{انرژی}$$

این بدان معناست که انرژی از دو بخش تشکیل شده است، بخش اول که بخش تبدیل پذیری آن است و اگرژی نام دارد و دیگری بخش تبدیل ناپذیری آن است که انرژی نامیده می شود. برخی اگرژی را خاصیت سیستم می دانند که به محیط بستگی دارد. در واقع، اگرژی خاصیت جسم نیست، زیرا خاصیت بستگی به شرایط جسم دارد، در صورتی که اگرژی به محیط نیز بستگی دارد. اگرژی خاصیت مشترک بین محیط و جسم است [۲۱]. از نظر ترمودینامیکی اگرژی بیانگر ارزش حامل انرژی و از نظر اقتصادی نیز اگرژی مبین ارزش حامل انرژی است، چرا که خریدار بهای پتانسیل انجام دادن تغییر را پرداخت می کند [۲۲].

## ۶. ترمواکونومیک

آموزش و مطالعه اگرژی و تحلیل قانون دوم تاکنون برای سیستم های مصرف کننده انرژی به صورت گسترده ای انجام شده است. اما مبحث ترمواکونومیک فقط در تحقیقات مشاهده می شود. ترمواکونومیک علم صرفه جویی انرژی بر اساس ترکیب قانون دوم ترمودینامیک و مفاهیم اقتصادی است [۲۳]. برای بهینه سازی یک سیستم حرارتی، روشهای تئوری بسیاری وجود دارد که می توان آنها را به دو دسته عمده تقسیم کرد: در دسته اول بهینه سازی بدون در نظر گرفتن مسائل اقتصادی طرح صورت می گیرد، ولی در دسته دوم مسائل اقتصادی طرح نیز لحاظ می شوند. برای مثال، به دست آوردن شرایط کارکرد یک سیستم برای حالتی که سیستم در آن شرایط در حداکثر بازده خود کار کند بدون در نظر گرفتن هزینه ای که صرف به وجود آوردن آن شرایط می شود، از جمله روشهای بهینه سازی در دسته اول به حساب می آید. در صورتی که یافتن شرایط کارکرد یک سیستم که در آن شرایط هزینه کارکرد آن حداقل مقدار ممکن باشد، خواه سیستم در حداکثر راندمان خود باشد خواه نباشد، از جمله روشهای بهینه سازی در دسته دوم محسوب می شود. روشهای اصلی مطالعه

ترموآکونومیک که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند، با عناوین مختلف بیان می‌شوند، از قبیل:

الف. تئوری هزینه انرژی<sup>۱</sup>، ب. روش قیمت میانگین<sup>۲</sup>، پ. روش هزینه انرژی مخصوص<sup>۳</sup>، ت. تحلیل ترموآکونومیک به روش وظیفه‌ای<sup>۴</sup> که همگی آنها بر اصل تعیین شرایط کارکرد سیستم در حالت بهینه و حداقل هزینه بنا شده‌اند. همان طور که بیان شد، برای بهینه ساختن یک سیکل ترمودینامیکی می‌توان روش‌های متعددی را بکار برد. روشهای اولیه بر اساس بهینه ساختن عملکرد سیکل یا به حداقل رساندن یک تابع هدف صرفاً رمودینامیکی مانند به حداقل رساندن تولید انتروپی یا اتلافات کار مفید است. در تمام این روشها بازده سیستم به حداکثر مقدار می‌رسد. در این گونه روشها هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، بسیار بالا است، اما در تحلیل ترموآکونومیک با به کارگیری مفاهیم اقتصادی در کنار تعاریف ترمودینامیک و با دادن ارزش اقتصادی به جریانهای انرژی و انرژی، تعادل بین هزینه‌های سرمایه‌ای و هزینه‌های جریان انرژی و انرژی به گونه‌ای برقرار می‌شود که تولید محصول سیکل ترمودینامیکی با حداقل هزینه کل و بیشترین میزان بهره‌وری صورت پذیرد. اساساً در این روش تلاش بر به حداقل رساندن یک تابع هدف است که در آن برای هم سطح سازی عبارات به میزان اتلافات و عدم بهره‌وری در سیستم ارزش اقتصادی داده می‌شود و با به حداقل رساندن تابع هدف، هم میزان این اتلافات و هم هزینه‌های سرمایه‌گذاری سیستم، به کمترین مقدار رسانده می‌شود. یکی از روشهای مؤثر که در چند سال اخیر برای تحلیل ترموآکونومیک سیستم‌های گرمایی به خصوص نیروگاههای تولید الکتریسیته به کار می‌رود، روش قیمت انرژی تولیدی<sup>۵</sup> است که در ادامه با ذکر دو مثال نحوه فرمولبندی این روش بررسی شده است.

- 
1. Exergy Cost Theory
  2. Average Cost Method
  3. Specific Exergy Costing Method
  4. Thermoeconomic Functional Analysis
  5. Exergy Production Cost Method



توربین:

$$C_{ele} + C_{oT} = C_{iT} + \frac{\phi f I_T}{H}$$

کلکتور:

$$C_{oc} = C_{ic} + \frac{\phi f I_c}{H}$$

در این معادلات  $C_{ele} = W_{net} \cdot c_{ele}$  ،  $C_{op}$  قیمت جریان خروجی از پمپ بر حسب دلار \$ ،  $C_{ip}$  قیمت جریان ورودی به پمپ بر حسب دلار \$ ،  $\phi$  عامل نگهداری تجهیزات ،  $f$  عامل سالیانه ،  $IP$  سرمایه گذاری اولیه برای پمپ بر حسب دلار \$ ،  $H$  زمان کل کارکرد سیستم بر حسب ساعت ،  $WP$  کار پمپ بر حسب کیلو وات  $kW$  ،  $C_{ele}$  قیمت کل برق تولیدی بر حسب دلار \$ ،  $C_{iT}$  قیمت جریان ورودی به توربین بر حسب دلار \$ ،  $C_{oT}$  قیمت جریان خروجی از توربین بر حسب دلار \$ ،  $IT$  سرمایه گذاری اولیه برای توربین بر حسب دلار \$ ،  $C_{ic}$  قیمت جریان ورودی به کلکتورها بر حسب دلار \$ ،  $C_{oc}$  قیمت جریان خروجی از کلکتورها بر حسب دلار \$ ،  $W_{net}$  مقدار توان تولیدی سیستم بر حسب کیلو وات  $kW$  و  $c_{ele}$  قیمت واحد برق تولیدی بر حسب دلار بر کیلو وات ساعت  $\$/kWh$  است. ارتباط بین قیمت و انرژی در رابطه قیمت کلی جریانها با قیمت واحد آنها وارد می شود و از این طریق انرژی به عنوان پتانسیل اجرای کار جریان به هزینه پرداخت شده برای رسیدن جریان به آن انرژی ارتباط پیدا می کند. رابطه قیمت کلی جریان با انرژی به صورت زیر بیان می شود.

$$C = \dot{m}.e.c$$

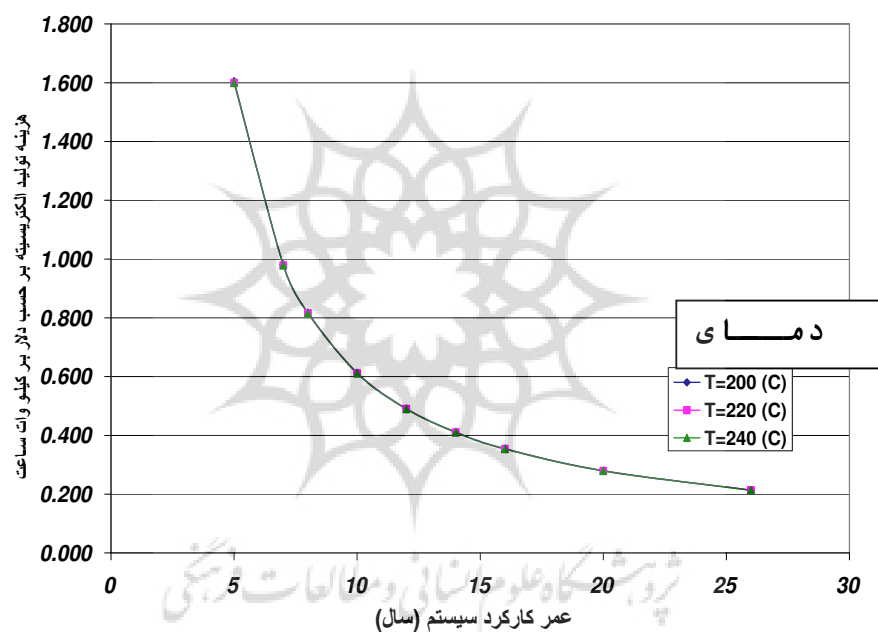
در این رابطه  $C$  قیمت کلی جریان بر حسب دلار \$ ،  $\dot{m}$  دبی جرمی جریان بر حسب کیلوگرم بر ثانیه  $kg/sec$  ،  $e$  انرژی مخصوص جریان بر حسب کیلو ژول بر کیلوگرم

$\text{kJ/kg}$  و  $c$  قیمت واحد جریان بر حسب دلار بر کیلو وات ساعت  $\$/\text{kWh}$  است. با نوشتن چنین معادلات بالانس قیمتی برای هر یک از اجزای سیستم مد نظر و جایگذاری معادلات در یکدیگر، در انتها به یک معادله برای قیمت واحد برق تولیدی بر حسب اگزرژپهای نقاط مختلف سیستم و به طبع آن، به شرایط ترمودینامیکی گوناگون نقاط مختلف سیستم می‌یابیم. قدم بعدی، رسیدن به حداقل قیمت محصول مورد نظر و شرایط کارکرد سیستم است. قیمت را در واقع، با یک مسئله بهینه سازی با یک سری شرایط محاسبه می‌کنند [۲۵]؛ یعنی قیمت را می‌توان با یکی از روشهای بهینه سازی سازگار با سیستم ارائه کرد. در یک مطالعه انجام شده بر روی سیستم تولید قدرت نیروگاه خورشیدی شیراز با سیکل کاری ارائه شده در شکل ۳ [۲۶ و ۲۷] این نتیجه حاصل شد که قیمت برق تولیدی نیروگاه خورشیدی به دمای روغن ورودی به مزرعه کلکتورها وابستگی زیادی ندارد و شرایط کارکرد بهینه برای نیروگاه با تغییر درجه حرارت روغن ورودی به مزرعه کلکتورها طوری تغییر می‌کند که با تغییرات دبی روغن خود را به حالت شرایط کارکرد در حداقل قیمت برق تولیدی برساند؛ یعنی تغییر درجه حرارت بیشتر از تغییر دبی روغن مستلزم صرف هزینه است و باعث افزایش قیمت برق تولیدی نیروگاه می‌شود [۲۸].

در شکل ۳ روند تغییرات قیمت با درجه حرارت روغن ورودی به مزرعه کلکتورها بر حسب سال کارکرد یا عمر نیروگاه از ۵ سال تا ۲۵ سال نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، عمر نیروگاه در قیمت برق تولیدی نیروگاههای خورشیدی همانند نیروگاههای فسیلی عامل مؤثری است، ولی دمای ورودی اولیه تأثیر ناچیزی دارد. مطالعات نشان می‌دهد هزینه برق تولیدی از نیروگاههای خورشیدی باید در حدود  $5 \$/\text{kWh}$  باشد تا این گونه نیروگاهها با نیروگاههای سوخت فسیلی قابل رقابت باشند. این در حالی است که تحقیقات انجام شده بر روی نیروگاه SEGS VI با ظرفیت ۳۰ MW نشان می‌دهد که هزینه برق تولیدی برای آن  $17 \$/\text{kWh}$  است، در صورتی که تنها از انرژی خورشیدی استفاده کند و برابر  $14.1 \$/\text{kWh}$  می‌شود، در صورتی که از سیستم هیبرید هم استفاده شود [۲۹].

علت بالا بودن قیمت برق نیروگاه خورشیدی شیراز نسبت به دیگر نیروگاههای خورشیدی جهان طولانی بودن زمان ساخت نیروگاه و اجرای مرحله ساخت اجزای آن برای اولین بار در

ایران است. همچنین، می‌توان کم بودن توان خروجی این نیروگاه تحقیقاتی را نیز جزء عوامل افزایش قیمت برق تولیدی این نیروگاه نسبت به نیروگاههای خورشیدی متعارف دنیا دانست، زیرا در روش قیمت‌گذاری تولیدی (Exergy Production Cost (EPC) Method) به کار رفته در نیروگاه خورشیدی شیراز میزان توان خروجی نیروگاه ثابت و برابر ۲۵۰ کیلو وات ساعت فرض شده است و شرایط کارکرد بهینه برای رسیدن به این توان خروجی حاصل می‌شود.

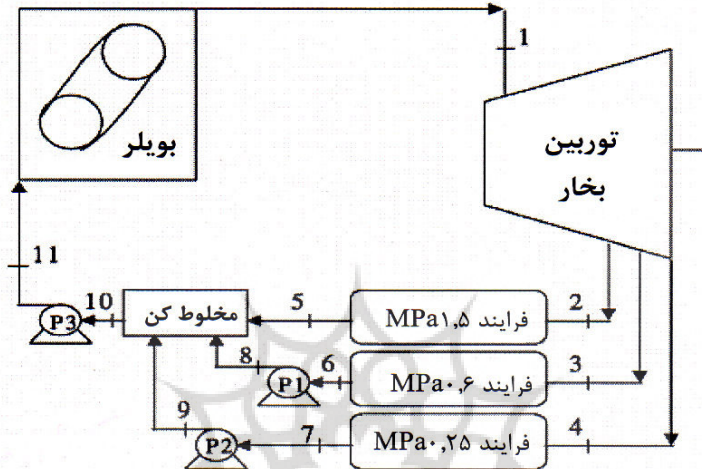


شکل ۳: روند تغییرات قیمت برق تولیدی نیروگاه خورشیدی شیراز با درجه حرارت روغن ورودی به مزرعه کلکتورها و عمر نیروگاه

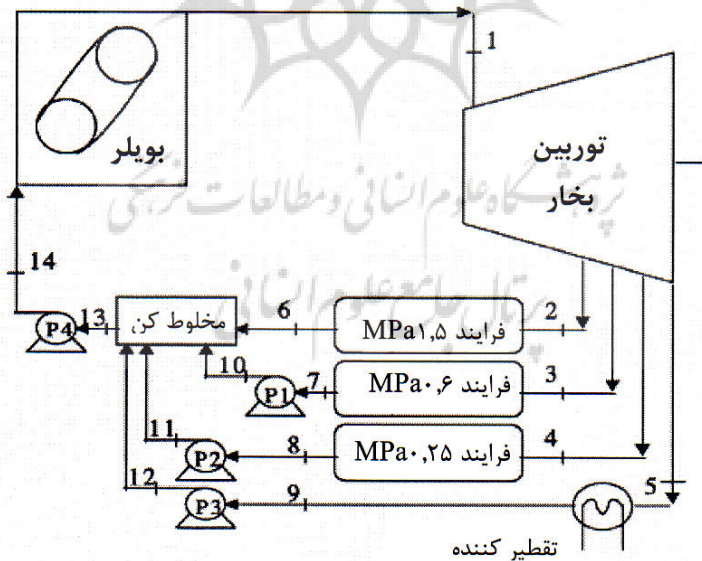
مثال ۲: سیستم‌های ترکیبی تولید توان و حرارت.

سیلوریا در سالهای ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ میلادی با اعمال روش EPC بر روی ۴ سیستم مختلف برای تولید توان و حرارت لازم برای کارخانه تولید محصولات شیمیایی در کشور برزیل

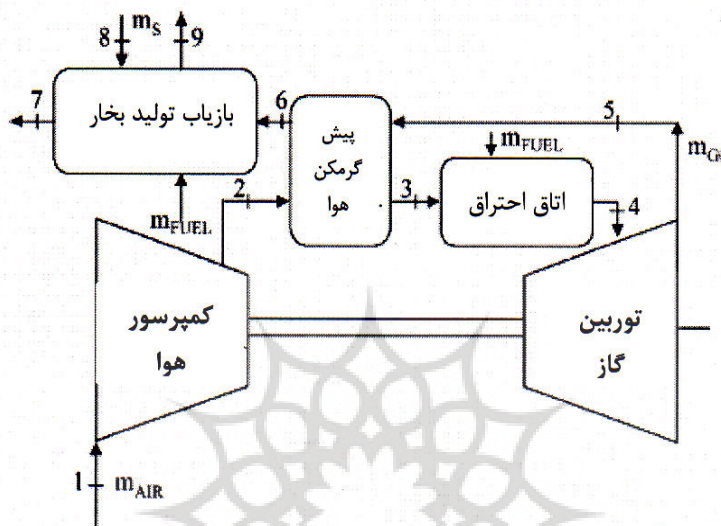
توانست بهترین سیستم از نظر حداقل هزینه و بیشترین کارایی را پیشنهاد دهد [۲۴ و ۳۰].  
چهار سیستم مورد مطالعه سیلوریا در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴: سیستم اول مورد مطالعه سیلوریا برای کارخانه محصولات شیمیایی در کشور برزیل



شکل ۵: سیستم دوم مورد مطالعه سیلوریا برای کارخانه محصولات شیمیایی در کشور برزیل



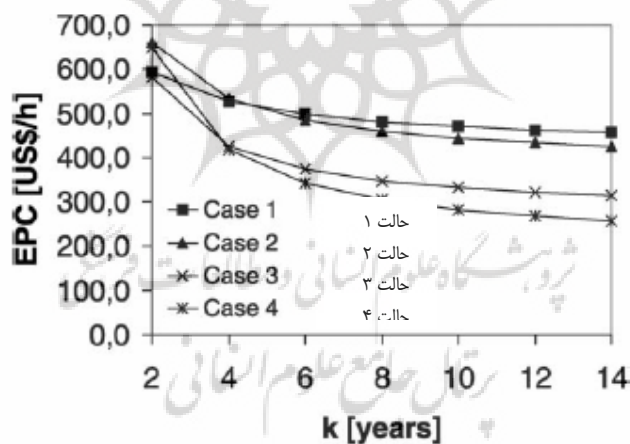
شکل ۶: سیستم‌های سوم و چهارم مورد مطالعه سیلوریا برای کارخانه محصولات شیمیایی در کشور برزیل

تفاوت سیستم سوم و چهارم، وجود یک مشعل میانی در قسمت Air preheater در سیستم سوم است و دیگر قسمتهای دو سیستم سوم و چهارم همانند هم هستند [۲۴ و ۳۰]. سیلوریا نتیجه مطالعات خود بر روی ۴ سیستم مذکور را در قالب جدول ۲ و شکل ۷ ارائه کرده است.



جدول ۲: مشخصات ترمودینامیکی و نتیجه مطالعات انجام شده بر روی هر کدام از سیستمهای چهارگانه مثال ۲.

	حالت		حالت	
	1	2	3	4
$T$ (°C)	500	500	$T_5$ (°C)	600
$P$ (MPa)	4.8	5.6	$Pr$	9.7
EPC (US\$/h)	510.6	503.6	EPC (US\$/h)	394.3
$E_p$ (kW)	2479	6000	$E_p$	6000
$c_{Sh}$ (US\$/kWh)	0.016	0.022	$c_{Sh}$ (US\$/kWh)	0.016
$c_{ELh}$ (US\$/kWh)	0.029	0.037	$c_{ELh}$ (US\$/kWh)	0.033
$c_{Se}$ (US\$/kWh)	0.035	0.039	$c_{Se}$ (US\$/kWh)	0.040
$c_{ELe}$ (US\$/kWh)	0.053	0.056	$c_{ELe}$ (US\$/kWh)	0.036
$m_1$ (kg/s)	5.834	10.386	$m_G$ (kg/s)	19.7
$m_{FUEL}$ (kg/s)	0.368	0.689	$m_{FUEL}$ (kg/s)	0.475



شکل ۷: نتیجه مطالعات سیلوریا بر روی چهار سیستم پیشنهادی برای کارخانه محصولات شیمیایی در کشور برزیل [۲۴ و ۳۰].

با توجه به مطالب ارائه شده در باره تحلیل ترموآکونومیک می‌توان موارد زیر را به عنوان نتیجه‌گیری بحث و جمع‌بندی ارائه کرد:

- با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین چالشها در برابر دولت‌ها و حکومتها تأمین مطمئن انرژی در آینده است و منابع سوخت فسیلی که در حال حاضر ۹۰٪ انرژی جهان را تأمین می‌کنند پایان‌پذیر هستند، لزوم استفاده هر چه بیشتر از منابع تجدیدپذیر و جایگزینی سوخت‌های فسیلی با این منابع باید با سرعت بیشتری انجام شود.
- تحلیل ترموآکونومیک شرایط بهینه در تولید یک محصول را برای مهندسان مکانیک و شیمی فراهم می‌کند. در واقع، آنها با در دست داشتن قیمت نهایی و شرایط بهینه کارکرد، تصمیم‌گیری بهتری در باره یک سیستم حرارتی انجام خواهند داشت.
- با توجه به تحلیل ترموآکونومیک انجام شده بر روی یک سیستم می‌توان تأثیر شرایط مختلف کارکرد بر روی قیمت تمام شده سیستم را بررسی کرد و پارامترهایی را که بر روی قیمت بیشترین تأثیر دارند، پیدا کرد.
- پیشنهاد می‌شود درسی با عنوان "طراحی سیستم‌های گرمایی" به صورت اختیاری برای دوره کارشناسی رشته‌های مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی، مهندسی محیط زیست، مهندسی سیستم‌های انرژی و مهندسی هسته ای ارائه شود. محتوای این درس تکیه بر:
  - الف. طراحی سیستم‌های حرارتی؛
  - ب. بهینه سازی سیستم‌های حرارتی؛
  - پ. ارزیابی اقتصادی سیستم‌های حرارتی؛
  - ت. تعیین شرایط کارکرد برای حاصل شدن حداقل قیمت محصولات تولیدی در سیستم های گرمایی؛
  - ث. ارزیابی اقتصادی طرحهای استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر در سیستمهای گرمایی؛
  - ج. ارزیابی اقتصادی و ترمودینامیکی کاربرد انرژیهای تجدیدپذیر در سیستمهای ترکیبی گرمایی تاکید خواهد داشت و دروسی از قبیل ترمودینامیک، مکانیک سیالات و انتقال حرارت به عنوان دروس پیش نیاز این درس خواهند بود.

## مراجع

۱. عسگری، منصور ، "تجزیه و تحلیل نقش انرژی در اقتصاد کلان ایران در طی سالهای ۷۸-۱۳۵۰"، چهارمین همایش ملی انرژی، تهران، اردیبهشت ۱۳۸۲.
2. Kosonen, M., and et. al., Finland's Fourth National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Hämeen Kirjapaino 2006.
۳. "آینده انرژی"، گفتگو با پروفیسور رضا ابرهی، **خبرنامه انجمن انرژی خورشیدی ایران**، سال یازدهم، شماره ۳۷، اردیبهشت ۱۳۸۵.
۴. "بررسی و مقایسه بازتاب کننده‌های پلیمری آلومینیومی و شیشه‌ای در نیروگاههای حرارتی خورشیدی"، **خبرنامه انجمن انرژی خورشیدی ایران**، سال یازدهم، شماره ۳۷، اردیبهشت ۱۳۸۵.
5. Halsnees, K., A. Garg. Sustainable development energy and climate, UNEP, 2006.
۶. طاهری، منصور و امیر رحیمی، "اولویتهای اساسی در تغییر ساختار آموزش مهندسی شیمی در ایران"، **فصلنامه آموزش مهندسی ایران**، سال ششم، شماره ۲۱، بهار ۱۳۸۳.
۷. دانشگاه نیوبرانزویک، کانادا ( [www.unb.ca](http://www.unb.ca) )
۸. دانشگاه نیو مکزیکو، امریکا ( [www.unm.edu](http://www.unm.edu) )
۹. صفار اول، مجید و همکاران ، " شناخت ساختار آموزش کارشناسی مهندسی مکانیک در ایران و مقایسه آن با برخی دانشگاههای جهان"، **فصلنامه آموزش مهندسی ایران**، سال نهم، شماره ۳۳ ویژه مهندسی مکانیک، بهار ۱۳۸۶.
10. Makerere University, Final Report of Solar Water Heaters in Industrial Processes, Uganda, 1 July 2004.
11. German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics, Section Systems Analysis and Technology Assessment, "Concentration Solar Power for the Mediterranean region" (Final Report), Stuttgart, 16th of April 2005.
۱۲. یعقوبی، محمود و ابوالحسن مختاری، "امکان سنجی نیروگاه خورشیدی در ایران از نظر تابش خورشید"، اولین کنفرانس مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی، خرداد ۱۳۸۵.
۱۳. نقی‌زاده، محمد، "جایگاه آموزش‌های زیست محیطی در آموزش رشته‌های مهندسی"، **فصلنامه آموزش مهندسی ایران**، سال ششم، شماره ۲۳، پاییز ۱۳۸۳.
۱۴. دانشگاه سان دیاگو، امریکا ( [www.sandiego.edu](http://www.sandiego.edu) )
۱۵. دانشگاه توکیو، ژاپن ( [www.u-tokyo.ac.jp](http://www.u-tokyo.ac.jp) )
۱۶. دانشگاه مینیسوتا، امریکا ( <http://www.me.umn.edu/labs/tmel> )
17. Cengel, Y.A., M.A. Boles, **Thermodynamics - an Engineering Approach**, Boston, MA: McGraw-Hill. 1998.

۱۸. Y. A. Cengel, "روشهای نوآورانه در تدریس ترمودینامیک"، ترجمه گلناز زارعی، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، سال ششم، شماره ۲۲، تابستان ۱۳۸۳.

19. Bejan, A., **Entropy Generation Minimization Boca Raton, FL: CRC Press; 1996.**
20. Brewer, K.M., Exergy Methods for the Mission Level Analysis and Optimization of Generic Hypersonic Vehicles, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, April 21, 2006.
21. Shukuya, M., A. Hammache, Introduction to the Concept of Exergy-for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems. IEA ANNEX37, VTT Research Notes 2158, 2002.
22. Rosen, M.A., I. Dincer, "Exergy-cost-energy-mass Analysis of Thermal Systems and processes". **Energy Conversion and Management**, 2003, 44:1633-1651.
23. Torres, C. A., Valero, L. Serra & J. Royo, Structural Theory and Thermo-economic Diagnosis, Part I. On malfunction and dysfunction analysis Energy Conversion and Management 43 (2002) 1503-1518.
24. Silveira, J.L., C.E. Tuna, Thermo-economic Analysis Method for Optimization of Combined Heat and Power Systems, Part I, Progress in Energy and Combustion Science, 29 (2003) 479-485.
25. Chapra, S.C., R.P. Canale, **Numerical Methods for Engineers**, McGraw-Hill. 1998.
26. Kenary, A., M. Yaghoubi & F. Doodgar, Experimental and Numerical Studies of a Solar Parabolic Trough Collector of 250 KW Pilot Solar Power Plant in Iran, Sharjeh Solar Energy Conference, Sharjeh UAE, February 2001, 19-22.
27. Yaghoubi, M., K. Azizian & A. Kenary, Simulation of Solar Power Plant for Optimal Assessment, Renewable Energy 28, 2003, 1985-1998.
28. Yaghoubi, M., A. Mokhtari & R. Hesami, "Thermo-economic Analysis of Shiraz Solar Thermal Power Plant, Proceedings of the Third International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, May 21-23, 2007, Amman, Jordan
۲۹. مختاری، ابوالحسن، محمود یعقوبی و شهرام چگینی، "راههای کاهش قیمت برق تولیدی نیروگاههای گرمایی خورشیدی با کلکتورهای سهموی خطی"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس سراسری بهینه سازی مصرف انرژی ۲۰ و ۲۱ تیر ۱۳۸۶.
30. Silveira, J.L., C.E. Tuna, "Thermo-economic Analysis Method for Optimization of Combined Heat and Power Systems. Part II". Progress in Energy and Combustion Science. 2004; 30:673

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۵/۱۱)

(تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۷/۳/۸)