

مدلسازی و تحلیل سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان از دیدگاه اگزرژیواکونومیک در یک مورد مطالعاتی چهار مگاواتی

در طراحی و تحلیل سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان، نحوه‌ی چیدمان تجهیزات در فرآیند تولید اهمیت ویژه‌ای دارند. طراحی مناسب این چیدمان‌ها می‌تواند باعث صرفه جویی یا در مقابل آن باعث ایجاد هزینه‌های اضافی غیر قابل توجیه گردد. در این مقاله، ابتدا با استفاده از یک مدل تکرار شونده پایین به بالا که یک روش هدف‌گذاری اصلاحی جدید تولید همزمان می‌باشد، چیدمان توربین‌های بخار بین سطوح بخار برای مورد مطالعاتی تعیین شده و در صورت تامین نشدن توان مورد نیاز در سایت جامع توسط توربین‌های بخار استفاده از توربین‌گازی یا توربین‌کندانس برای تولید توان اضافی بررسی می‌گردد. نتایج تحقیق نشان داد که سناریوی منتخب چیدمان توربین‌های بخار فشار برگشتی در کنار سامانه توربین‌گازی، دارای بازدهی اگزرژی ۸۳ درصد، تخریب اگزرژی ۱۸۸۱/۳ کیلووات و مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزرژی ۳۴۰/۹ دلار بر ساعت می‌باشد. در نهایت، استفاده ترکیبی از چیدمان توربین‌های بخار فشار برگشتی در کنار سامانه توربین‌گازی، از دیدگاه اگزرژیواکونومیک به عنوان بهترین چیدمان پیشنهاد شدند.

یاسر شکری^۱

کارشناسی ارشد

مهرانگیز قاضی^۲

استادیار

محمد نیکیان^۳

استادیار

واژه های راهنما: تحلیل اگزرژیواکونومیک، اگزرژی، سایت جامع، یوتیلیتی سایت جامع، تولید همزمان.

۱- مقدمه

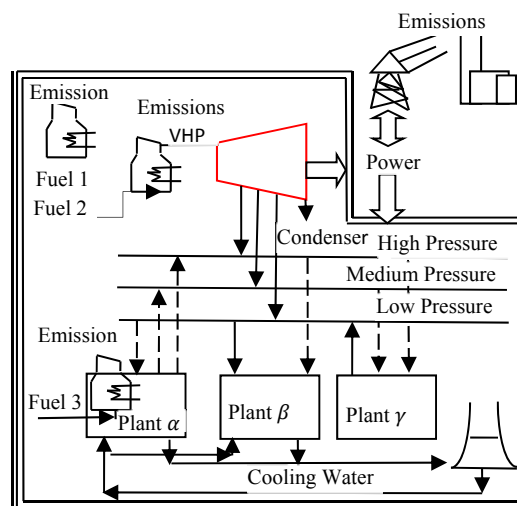
اکثر فرآیندهای صنعتی به نوعی یک مجموعه کلی هستند که توسط یک مجموعه خدمات جانبی مرکزی به یکدیگر متصل شده‌اند. بخار با فشار بالا با عبور از توربین، تولید توان می‌کند که برای راه اندازی پمپ‌ها، کمپرسورها و سایر تجهیزات فرآیندی استفاده می‌شود. خود فرآیندها نیز بخار را در ترازهای مختلف مصرف و یا تولید می‌کنند [۱]. قبل از اجرای پروژه‌های مربوط با بهینه سازی مصرف انرژی در یک سیستم یوتیلیتی موجود، میزان دقیق این صرفه جویی لازم است که معین شود، که بدون مطالعه دقیق سیستم یوتیلیتی امکان پذیر نیست [۲]. شکل (۱) نمونه‌ای از سیستم یوتیلیتی در سایت جامع را نمایش می‌دهد. در شکل (۱)، سه سطح فشار از بخار در سایت توزیع شده است و فرآیندهای مختلف به آنها متصل شده است، همانطور که مشاهده می‌شود تحلیل چنین سیستمی پیچیده است.

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان fluid_eng19@yahoo.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان M.ghazi@tiau.ac.ir

^۳ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان m.nikiyan@tiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۰۲، تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۲



شکل ۱- نمونه‌ای از سیستم یوتیلیتی سایت جامع [۳]

بخار در فشار و دماهای مختلف وجود دارد، برخی فرآیندها بخار مصرف می‌کنند و برخی تولید می‌کنند. همچنین بین فرآیندها و شبکه بخار تعامل وجود دارد، برخی فرآیندها حرارت اضافی خود را به شبکه بخار می‌دهند در حالی که برخی دیگر این حرارت را از شبکه دریافت می‌کنند. در شکل (۱)، تولید همزمان حرارت از طریق توربین‌های بخار وجود دارد تولید مفید حرارت و توان از یک منبع حرارتی را تولید همزمان توان و حرارت گویند که کارآمدترین روش جهت تولید توان و حرارت با هزینه پایین می‌باشد [۴]. در روشهای معمول برای تامین نیازهای الکتریکی و حرارت، الکتریسیته از شبکه توزیع سراسری و حرارت بوسیله سوزاندن سوخت در بویلرها و تجهیزات گرمازا به روش تولید جداگانه تامین می‌گردد، در این روش انرژی قابل توجهی به گونه‌ای متفاوت از طریق گازهای داغ خروجی دودکش، برج های خنک کن، کندانسورها، و همچنین تلفات توزیع و انتقال الکتریسیته در شبکه سراسری به هدر می‌رود که بیشتر این حرارت قابل بازیافت است و می‌تواند در تامین انرژی حرارتی مورد استفاده قرار گیرد، از طرفی الکتریسیته تولیدی به این روش به صورت متمرکز (نیروگاهی) بوده و تلفات انرژی زیادی را در بر دارد [۵ و ۶].

در مقابل این سیستم‌ها، استفاده از فن آوری ترکیبی از تولید همزمان برق و حرارت قرار دارد، از لحاظ ترمودینامیکی این روش به معنی تولید همزمان دو شکل انرژی یعنی الکتریکی و حرارتی، با استفاده از یک منبع انرژی اولیه می‌باشد. انرژی گرمایی از بازیافت تلفات حرارتی این مولدهای مستقل بدست می‌آید و این حرارت در بخشهای مختلف صنعتی، تجاری و مسکونی بکار گرفته می‌شود از طرفی الکتریسیته تولیدی توسط این فناوری به صورت محلی و مستقل و غیر متمرکز بوده که این دو ویژگی در کنار یکدیگر، کارایی مولدهای تولید برق را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، کارایی سیستم‌های معمول در حدود ۲۷ تا ۵۵ درصد می‌باشد که بیشترین کارایی مربوط به نیروگاههای سیکل ترکیبی می‌باشد، در حالیکه با بهره گیری از فناوری تولید همزمان برق و حرارت بصورت مستقل، کارایی انرژی این مولدها به محدوده ۹۰ درصد نیز خواهد رسید [۵]. در سال‌های اخیر بحران انرژی ناشی از کاهش منابع انرژی‌های فسیلی و افزایش قیمت آن، یکی از مسائل مهم و روز دنیا شده است، به همین دلیل سیاست گذاران و صاحبان صنایع در دنیا به فکر چاره جوئی افتادند که حاصل آن ابداع طرح‌های گوناگون برای روبرو شدن با این موضوع در طی سال‌های اخیر می‌باشد،

یک روش موثر، صرفه جویی و بهینه سازی در مصرف انرژی است که برای دست یافتن به این هدف راهکارهای گوناگونی ارائه شده است [۵ و ۶]. دهل^۱ و لینهوف^۲ [۷] یک روش گرافیکی برای تحلیل فرآیندها و سیستم تولید بخار در سایت جامع را ارائه کردند، آنها به منظور نمایش ترمودینامیکی سایت جامع بصورت گرافیکی از یک منحنی آنتالپی-دمای توسعه یافته استفاده نمودند. روش دهل و لینهوف توسط رسی^۳ [۸] و سپس کلمس^۴ و همکاران [۳] توسعه داده شد. رسی [۸] همچنین به مقایسه و ارزیابی مصرف سوخت و پتانسیل تولید توان در هنگام تعیین سطوح بخار در یک سناریوی مشخص پرداخت و دو حالت حداقل نمودن نیاز به سوخت و حداقل نمودن هزینه‌های سیستم تولید بخار را در طراحی خود در نظر گرفت.

کلمس و همکاران [۸] نشان دادند که با استفاده از منحنی‌های ترکیبی می‌توان یک سایت جامع را از نقطه نظر ترمودینامیکی برای مشخص کردن میزان نیاز به سوخت، بازیافت حرارت و تولید همزمان حرارت و توان هدف‌گذاری نمود. قنادزاده و همکاران [۹] روش جدید هدف‌گذاری تولید همزمان برای سیستم‌های یوتیلیتی سایت جامع را ارائه دادند. در این مقاله مدل تکرار شونده پایین به بالا را به منظور هدف‌گذاری سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان ارائه نمودند. در این مدل با استفاده از منحنی جامع ترکیبی مربوط به سیستم تولید بخار، دماهای ورودی به هر توربین در هر سطح فشار در شبکه بخار به ترتیب از پایین‌ترین سطح فشار به بالاترین سطح و به روش سعی و خطا محاسبه می‌شود. کاپیل^۵ و همکاران [۱۰] از دیدگاه هزینه‌های انرژی، روش دیگری را به منظور هدف‌گذاری سایت جامع بر مبنای طراحی بهینه سطوح فشار در سیستم تولید بخار سایت جامع ارائه دادند، آنها برای تخمین پتانسیل تولید همزمان از یک روش ترکیبی بر مبنای روش‌های تکرار شونده پایین به بالا و روش‌های تکرار شونده بالا به پایین استفاده نمودند. ماهیت روش هدف‌گذاری ارائه شده توسط آنها مشابه با روش قنادزاده و همکاران [۹] بود با این تفاوت که محاسبات آنها نتایج دقیق‌تری را داشت. قاضی [۱۱] مدلسازی و اصلاح سیستم‌های تولید همزمان در کل سایت را با استفاده از تئوری ساختاری و با رویکرد صنعتی تحلیل و همچنین بهترین چیدمان را از نظر اقتصادی معرفی کرد.

خوشگفتارمنش و همکاران [۱۲-۱۴] روش‌های نوینی در زمینه‌ی روش هدف‌گذاری تولید همزمان، بررسی اگزورژواکونومیکی و اگزورژویست محیطی یک سیستم تولید همزمان را ارائه دادند. واربانوف^۶ و همکاران [۱۵] با استفاده از روش مدل سخت افزاری توربین، یک مدل ریاضی به منظور محاسبه بار توربین بخار، توربین گاز، دیگ بخار و مبدل بازیاب حرارت بر اساس دمای اشباع سیال ورودی و خروجی استخراج نمودند، آنها با استفاده از مدل مذکور به بهینه‌سازی هزینه عملیاتی یک سایت جامع پرداختند. احمدی، دینسر^۷ و رزن^۸ [۱۶]، تحلیل اگزورژی و اگزورژواکونومیکی و زیست محیطی و بهینه‌سازی چند منظوره نیروگاه‌های سیکل ترکیبی را با الگوریتم تکاملی بررسی کردند. در این مقاله سه تابع هدف، متشکل از مینیمم نرخ قیمت کل، صدور مینیمم دی اکسید کربن و بازده ماکزیمم اگزورژی برای بهینه‌سازی سیستم بررسی شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد

¹Dhole

²Linnhoff

³Raissi

⁴Klemes

⁵Kapil

⁶Varbanov

⁷Dincer

⁸Rosen

با انتخاب بهترین تجهیزات و با استفاده از کمترین نرخ سوخت به محفظه احتراق می‌توان کمترین صدور آلاینده های زیست محیطی را به دست آورد. عامری و عنادی [۱۷] تحلیل اگزرژی و اگزرواکنونومیکی یک نیروگاه توربین گازی را به همراه مدل‌سازی ترمودینامیکی و تحلیل عملکرد سیستم را انجام داده‌اند. نتایج نشان می‌داد که افزایش دمای ورودی توربین گازی باعث افزایش بازدهی اگزرژی توربین گازی می‌شود. این افزایش بازدهی به علت افزایش توان خروجی توربین و کاهش اتلافات محفظه احتراق می‌باشد. شایان و همکاران [۱۸]، تحلیل اگزرژی اقتصادی و بهینه سازی سیستم ترکیبی گازسازی زیست توده با پیل سوختی اکسید جامد با دو عامل مختلف گازسازی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در شرایط بهینه، هنگامی که بخار به جای هوا استفاده می‌شود، توان خروجی خالص و بازده اگزرژی به ترتیب $14/8$ و $24/9\%$ افزایش یافت و هزینه واحد محصول سیستم $8/9\%$ کاهش یافت. نیکیل^۱ و همکاران [۱۹] تحلیل اگزرژی و شبیه سازی یک سیکل تولید همزمان 30 مگاواتی را ارائه نمودند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد غلظت محصولات احتراق تاثیر زیادی بر گرمای ویژه گازهای خروجی دارد چرا که آنتالپی محصولات احتراق کمتر از هوای فشرده حتی بعد از اضافه شدن سوخت به آن دارد. پیرمحمدی و همکاران [۲۰] از دیدگاه اگزرژی بهترین چیدمان تجهیزات برای تولید همزمان حرارت و توان در سایت جامع را ارائه نمودند.

روش الگوریتم اصلاحی یک روش مفهومی جدید است که در جهت اصلاح یک سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان گسترش داده شده است. بر این اساس، سیستم موجود به چند ساختار تقسیم شده و هر ساختار به طور جداگانه و با تاثیر از جزء پیشین بررسی و بهینه می‌شود. توزیع دبی بخار در توربین‌های بخار و زیر کش‌های آن، مقدار بخار تولیدی، نوع و مقدار سوخت مصرفی به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شود. در واقع هدف از این روش، پیدا کردن مقدار توان تولیدی بین هر دو سطح بخار، پتانسیل تولید همزمان، دبی گذرنده از توربین‌ها، بار حرارتی بویلر و میزان مصرف سوخت می‌باشد. در روش اصلاحی جدید بازده آیزنتروپیک در هر مرحله، متغیر در نظر گرفته شده و این بازده متغیر در الگوریتم تکرار شونده لحاظ می‌گردد. بنابراین دقت محاسبات توان تولیدی توربین‌های بخار، دمای مافوق گرم سطوح و بار حرارتی بویلر با استفاده از روش الگوریتم اصلاحی، بیشتر می‌شود. کمینه سازی هزینه عملیاتی به منظور اصلاح سایت موجود، به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن هزینه عملیاتی به عنوان تابع هدف، سایت جامع به سه ساختار شامل توربین‌ها، چیدمان توربین‌ها بین سطوح و تولید کنندگان بخار تقسیم می‌گردد. استفاده از روش الگوریتم اصلاحی، باعث ساده نمودن فرآیند بهینه سازی یک سایت جامع می‌گردد به نحوی که اگر یک مساله پیچیده که دارای پارامترهای زیادی است تبدیل به یک مساله بهینه سازی ساده می‌شود که می‌توان آن را به روش ساده جستجو و مرتب سازی، حل نمود. به منظور بررسی عملکرد این روش، یک سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان به عنوان مورد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده ساده‌تر بوده و محاسبات کوتاه‌تری دارد. اصلاح سیستم موجود به کمک روش الگوریتم اصلاحی موجب کاهش تقریباً $14/1$ درصد در هزینه عملیاتی و $14/3$ درصد در مصرف سوخت بدون اضافه کردن تجهیز جدید در سایت جامع می‌گردد.

¹ Nikhil

در این پژوهش، مدل‌سازی و تحلیل سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان از دیدگاه اگزورژواکونومیک در یک مورد مطالعاتی چهار مگاواتی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا یک مدل اصلاحی به‌عنوان یک روش هدف‌گذاری جدید تولید همزمان ارائه می‌گردد، و با توجه به داده‌های طراحی یک سیستم تولید همزمان در سایت جامع، ابتدا پتانسیل توان در سایت جامع محاسبه خواهد شد و با توجه به توان تولیدی محاسبه شده و همچنین میزان بخار تولیدی در هر سطح بخار که نشانگر پتانسیل تولید همزمان می‌باشند، مناسب‌ترین چیدمان توربین‌های بخار فشار برگشتی، توربین‌های کندانسی و توربین‌های گازی که کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزورژی را داشته باشند پیشنهاد خواهند شد. با محاسبات انجام شده و نتایج به دست آمده در این مقاله در مقایسه با نتایج بدست آمده در روش‌های قبلی موجود در مقالات، با این تفاوت می‌باشد که به صورت مفهومی، ساده تر و با محاسبات کوتاه تر نسبت به سایر روش‌ها انجام می‌گیرد و همچنین دسترسی به جواب سریع تر می‌باشد.

برای حل مسئله فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- ۱- میزان توان تولیدی و حرارت موردنیاز سایت، ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- اجزای سیستم تولید همزمان در حالت پایا کار می‌کنند.
- ۳- از اگزورژی‌های جنبشی و پتانسیل چشم‌پوشی می‌شود.
- ۴- دما و فشار حالت مرده به ترتیب ۲۹۳/۱۵ کلوین و ۱/۰۱ بار در نظر گرفته می‌شوند.

۲- تحلیل اگزورژواکونومیک

اگزورژی نیز مانند انرژی، دارای مؤلفه‌های مختلفی است. در غیاب اثرات میدان‌های هسته‌ای، مغناطیسی، الکتریکی و کشش سطحی، می‌توان رابطه (۱) را برای اگزورژی جریانی از مواد نوشت [۲۱] [۲۲].

$$E_X = Ex_K + Ex_P + Ex_{PH} + Ex_{CH} \quad (1)$$

جهت انجام تحلیل اگزورژی نیازمند بالانس جرمی و بالانس انرژی سیستم برای بدست آوردن نرخ دبی‌ها و نرخ انتقال حرارت در سطح کنترل هستیم. با اعمال یکی از این بالانس‌ها به قوانین اول و دوم ترمودینامیک، فرمولی برای بالانس اگزورژی بدست خواهد آمد [۱۶]، [۲۳]. رابطه (۲) معادله انرژی و رابطه (۳) معادله بالانس اگزورژی را نشان می‌دهد.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (2)$$

$$\dot{E}_Q + \sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e + \dot{E}_w + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (3)$$

که پانویس‌های i و e به ترتیب، معرف جریان‌های ورودی و خروجی حجم کنترل می‌باشند. برای محاسبه نرخ اگزورژی فیزیکی از رابطه (۴)، و اگزورژی شیمیایی، برای مخلوط گازها که مقدار آن برحسب مول گاز (K) می‌باشد، از رابطه (۵)، استفاده می‌شود.

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (4)$$

$$\overline{ex}_{\text{mix}}^{\text{CH}} = \sum_{i=1}^n x_i e_x^{\text{CH}_i} + \overline{R}T_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \quad (5)$$

در رابطه (۵) x_i جزء مولی k ام در مخلوط، $e_x^{\text{CH}_i}$ مقدار انرژی شیمیایی استاندارد آن ماده، \overline{R} ثابت گازها و T_0 دمای محیط است. و برای محاسبه توان توربین‌های بخار از رابطه (۶) استفاده می‌کنیم [۲۴]، [۱۳].

$$\dot{W}_i = \dot{m}_i (h_i - h_{i+1}) \quad (6)$$

انرژی سوخت به طور تقریبی با استفاده از فرمول (۷) قابل محاسبه می‌باشد، و همچنین برای یک سوخت گازی با ترکیب $C_x H_y$ ، رابطه تجربی (۸) جهت تخمین ξ استفاده می‌شود [۱۶].

$$\xi = \frac{ex_f}{LHV_f} \quad (7)$$

$$\xi = 1.033 + 0.0169 \frac{y}{x} - \frac{0.0698}{x} \quad (8)$$

نسبت توان به حرارت که معرف شرایط عملکردی یک سایت می‌باشد، در رابطه (۹) تعریف شده است و همچنین بازده انرژی، از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۴]، [۲۴]:

$$R = \frac{W}{Q_{\text{heat}}} \quad (9)$$

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\sum Ex_{\text{out}}}{\sum Ex_{\text{in}}} \quad (10)$$

ترکیب قانون دوم ترمودینامیک با نگرش‌های اقتصادی ابزاری قدرتمند را برای مطالعه و بهینه سازی سیستم‌های انرژی ارائه می‌دهد. در تحلیل انرژی اقتصادی بالانس هزینه برای هر جزء محاسبه می‌گردد. اعمال یک بالانس هزینه برای اجزاء سیستم K ام نشان دهنده این امر است که جمع نرخ هزینه‌های مرتبط با کل جریان انرژی موجود مساوی است با مجموع نرخ هزینه‌های جریان‌های انرژی ورودی به علاوه هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری تجهیزات، این بالانس بصورت زیر فرمول بندی می‌گردد [۲۱]، [۲۴].

$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{W,K} = \dot{C}_{q,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_K \quad (11)$$

$$\dot{C}_j = c_j E_j \quad (12)$$

هزینه مربوط به سوخت (\dot{C}_F) و محصول (\dot{C}_P) در یک جزء با جابجایی نرخ‌های انرژی (\dot{E}_X) به دست می‌آیند. با ترکیب بالانس انرژی و بالانس اقتصادی می‌توان به رابطه زیر رسید [۲۱].

$$\dot{E}_{F,K} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{L,k} + \dot{E}_{D,k} \quad (13)$$

که $\dot{E}_{F,K}$ معرف نرخ انرژی سوخت (خوراک) جزء K ام، $\dot{E}_{P,K}$ معرف نرخ انرژی محصول جزء K ام است. همچنین $\dot{E}_{D,K}$ و $\dot{E}_{L,K}$ به ترتیب نرخ انرژی اتلافی و تخریبی جزء K ام سیستم می‌باشند.

هزینه‌ی نرخ تخریب انرژی که بر واحد دلار بر ساعت می‌باشد از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود که مقدار $C_{f,k}$ در این پژوهش $\$/MJ$ ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است [۲۵ و ۱۶].

$$\dot{C}_{D,k} = c_{f,k} \times \dot{E}_{D,k} \quad (14)$$

که $\dot{E}_{D,k}$ طبق رابطه‌ی (۱۵) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\dot{E}_{D,k} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e \quad (15)$$

برای محاسبه نرخ هزینه سرمایه‌گذاری از رابطه (۱۶) استفاده می‌شود، در این رابطه φ ، ضریب نگهداری تجهیزات که عموماً ۱/۰۶ فرض می‌شود و CRF، فاکتور بازگشت سرمایه^۱، N تعداد ساعات کارکرد تجهیزات و Z_k تابع قیمت هر یک از تجهیزات می‌باشد [۲۲].

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{N \cdot 3600} \quad (16)$$

و همچنین فاکتور بازگشت سرمایه از رابطه (۱۷) بدست می‌آید [۲۴]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) پارامتر i نرخ بهره و n عمر تعیین شده تجهیزات می‌باشد.

تجهیزات مورد استفاده در این مقاله مانند بویلر، توربین بخار و توربین گاز هر کدام معمولاً به صورت یک تابع ارائه می‌گردند، در ادامه هر کدام از این توابع بررسی می‌شوند. تابع هزینه خرید بویلر به صورت رابطه (۱۸) بیان می‌شود:

$$Z_{BOILER} = 30337.015 m_B^{1.5} + 1407058.4 \quad (18)$$

که تابع Z_{BOILER} هزینه خرید بویلر بر حسب دلار و m_B دبی بخار بر حسب کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد [۲۶]. تابع قیمت خرید توربین بخار از رابطه (۱۹) بدست می‌آید که Z_{ST} بر حسب دلار و \dot{W}_{ST} توان بر حسب کیلووات می‌باشد [۲۶].

$$Z_{ST} = 151.13 \times \dot{W}_{ST} + 356250 \quad (19)$$

تابع قیمت خرید توربین گاز از رابطه (۲۰) بدست می‌آید [۲۷]. PC_{GT} قیمت خرید توربین گاز و $W_{D,GT}$ توان خروجی طراحی توربین گاز بر حسب کیلووات می‌باشد.

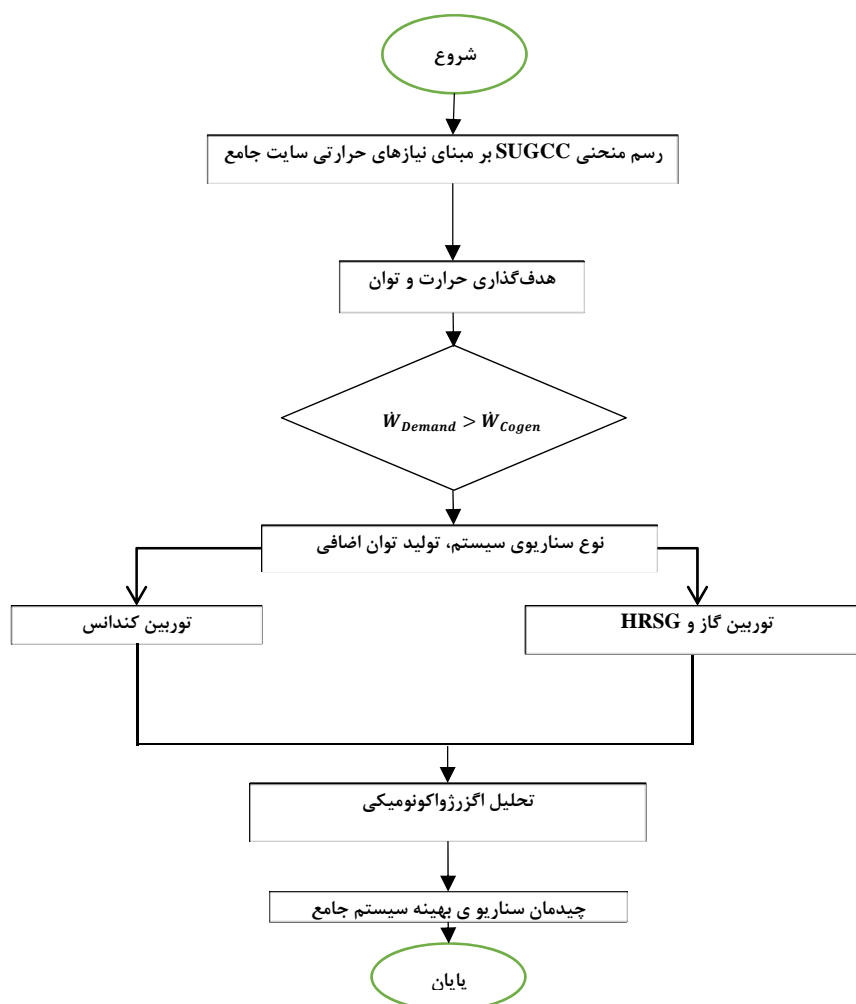
$$PC_{GT} = 0.3082 W_{D,GT} + 611.4 \quad (20)$$

در نهایت تابع هدف، رابطه (۲۱) به عنوان فرمول کلی جهت تعیین چیدمان بهینه از دیدگاه انرژی و اکونومیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\text{Objective Function: Min } (\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}) \quad (21)$$

الگوریتم روش کار در شکل (۲) نشان داده شده است.

¹ Capital Recovery Factor (CRF)



شکل ۲- الگوریتم روش کار

۳- تجزیه و تحلیل

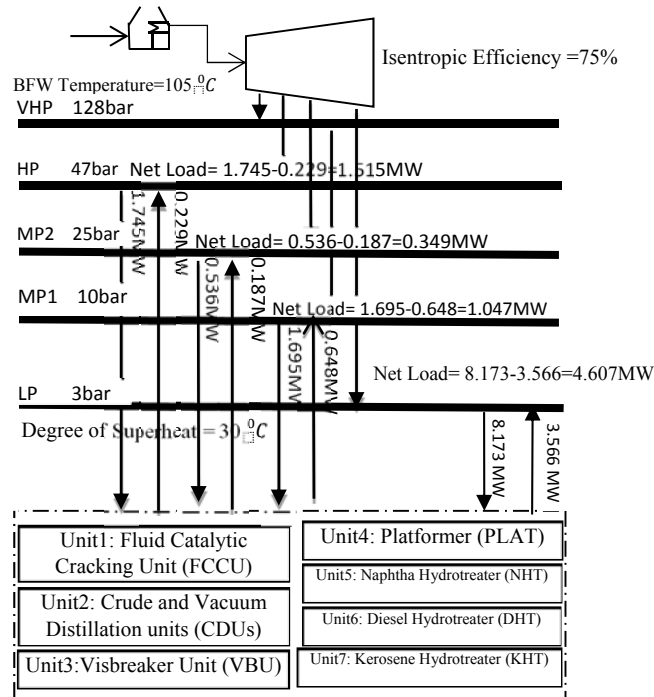
جهت بررسی قابلیت کاربردی روش تحلیل اگزروزواکونومیک در سایت جامع سامانه تولید همزمان حرارت و توان، یک مورد مطالعاتی چهار مگاواتی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- مورد مطالعاتی

در ابتدا برای نشان دادن قابلیت روش اصلاحی مدل تکرارشونده پایین به بالا^۱ (IBTM)، در تحلیل سایت جامع به‌عنوان مطالعه موردی، واحد سرویس‌های جانبی یک پالایشگاه انتخاب می‌شود. این پالایشگاه، پالایشگاه کلتکس^۲ در آفریقای جنوبی است که به‌عنوان مطالعه موردی در روش IBTM نیز انتخاب شده است، این پالایشگاه شامل یک برج تقطیر اتمسفریک نفت خام، یک برج تقطیر خلاء، واحد شکافت هیدروژن، واحد شکافت کاتالیستی، واحد کاهش گرانبوی، واحد تصفیه هیدروژنی نفتا، دیزل و کروژن، واحد پلاتفورمر می‌باشد [۹].

¹ Iterative Bottom-to-Top Model (IBTM)

² Caltex



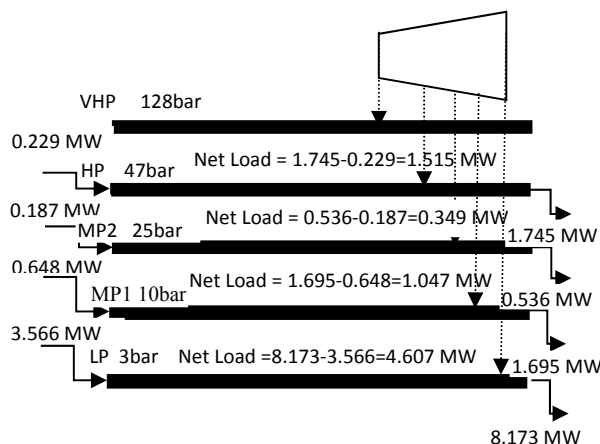
شکل ۳- سامانه یوتیلیتی سایت جامع واحد خدمات جانبی یک پالایشگاه [۹]

شکل (۳) داده‌های ورودی لازم برای هدف‌گذاری تولید همزمان در سامانه یوتیلیتی سایت در تعامل با هفت واحد پالایشگاه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، فرآیندهای مختلف در سایت جامع در حالی که به یک سیستم یوتیلیتی مرکزی مشترک متصل هستند، کار می‌کنند. در شکل (۳) پنج سطح فشار از بخار در سایت توزیع شده است و فرآیندهای مختلف به آنها متصل شده است، بخار با فشار بسیار بالا (VHP) در مولدهای بخار تولید می‌شود سپس این بخار با عبور از توربین‌ها و منبسط شدن، به تولید بخار در فشارهای بالا (HP)، متوسط (MP) و پایین (LP) تبدیل می‌شود در نهایت بخار توسط آب سردکننده، چگالیده می‌شود. توربین‌های بخار توان تولید می‌کنند، همچنین ممکن است میزانی توان برای جبران کمبود، از شبکه وارد و یا توان اضافه به شبکه صادر شود [۴]. پارامترهای مربوط به یوتیلیتی سایت جامع در شکل (۴) نشان داده شده است. سامانه بخار شامل پنج سطح بخار و آب سرد می‌باشد. بخار با فشار بسیار بالا در فشار ۱۲۸ bar در بویلر تولید می‌شود. فرض شده که کندانس بازگشتی و آب ورودی به بویلر در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد هستند.

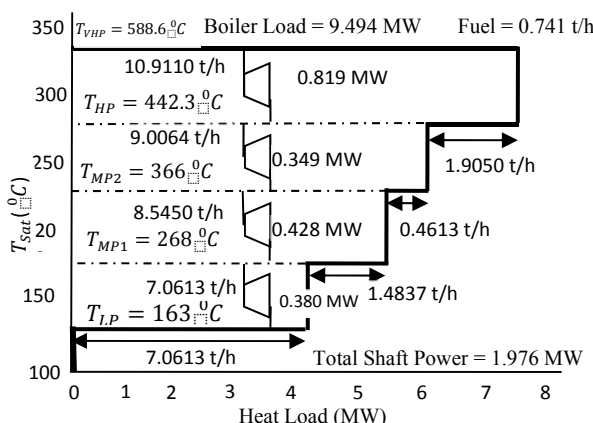
۳-۲- هدف‌گذاری حرارت و توان

پس از تهیه اطلاعات موردنیاز سایت جامع، مدل اولیه نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع (SUGCC) همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، ترسیم می‌گردد. در نمودار اولیه یوتیلیتی سایت جامع، میزان بار حرارتی تولید شده و مورد نیاز در هر سطح، فشار و دمای بخار اشباع در هر سطح نشان داده می‌شود.

¹ Site utility grand composite curve



شکل ۴- واحد یوتیلیتی سایت جامع برای مورد مطالعاتی



شکل ۵- نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع پس از هدف گذاری به کمک الگوریتم اصلاحی IBTM

دمای واقعی بخار فشار پایین (۱۶۳ درجه سانتی گراد)، با اضافه کردن یک مقدار فرضی درجه سوپرهیت ۳۰ درجه سانتی گراد به دمای اشباع آن (۱۳۳ درجه سانتی گراد) مشخص می شود [۹]. سپس با شروع از سطح فشار پایین، دمای همه سطوح از روش IBTM اصلاح شده به دست می آید [۱۱]. شکل (۵) نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع را پس از هدف گذاری به کمک الگوریتم اصلاحی IBTM برای نمونه مطالعاتی را نشان می دهد. پتانسیل تولید توان در حالت همزمان کامل در این مورد مطالعاتی (MW) ۱/۹۷۶ به دست می آید. اگر ارزش حرارتی سوخت (MWh/t) ۱۲/۸۱۹ در نظر گرفته شود، بار حرارتی بویلر و دبی سوخت به ترتیب برابر (MW) ۹/۴۹۴ و (t/h) ۰/۷۴۱ محاسبه می شود [۹]. در ادامه به معرفی نحوه کدگذاری سیستم یوتیلیتی سایت جامع پرداخته می شود. در شکل (۵) نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع، به منظور نمایش نحوه کدگذاری نشان داده شده است. در مدل ارائه شده تعداد N سطح بخار معلوم با نام i از پایین ترین سطح شماره گذاری شده اند. به این معنی که با در نظر گرفتن LP به عنوان پایین ترین سطح، شناسه i برای این سطح برابر ۱، برای سطح MP برابر با ۲، برای سطح HP برابر با ۳ و برای VHP برابر با ۴ است. نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع به M ناحیه انبساطی به وسیله بازه های دمایی مشخص تقسیم می شود. این مناطق به ترتیب از پایین

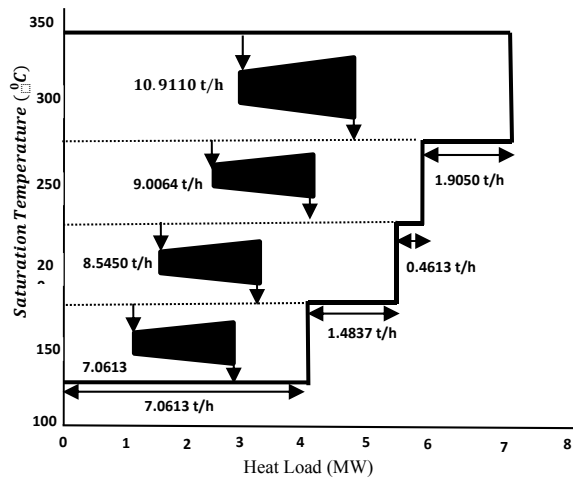
به بالا با اندیس J شماره گذاری می‌شوند. در این محدوده یک توربین بخار قرار می‌گیرد که آن هم با اندیس J از پایین به بالا شماره گذاری می‌گردد. این چیدمان توربین‌های بخار، پتانسیل تولید همزمان بین هر بازه دمایی را فراهم می‌کند.

۳-۳- انتخاب بهترین چیدمان تجهیزات سامانه تولید همزمان جهت تأمین حرارت و توان موردنیاز پالایشگاه از دیدگاه اگزرژیواکونومیکی

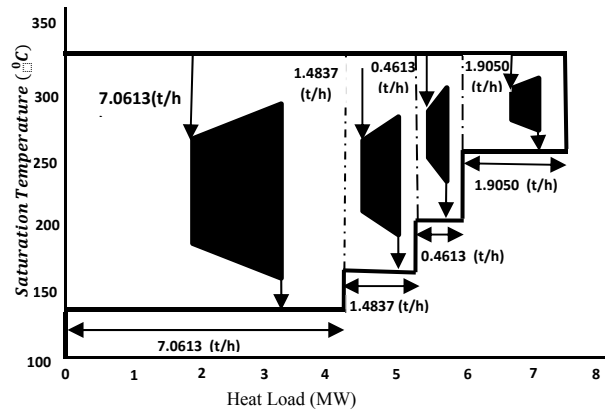
مطابق الگوریتم روش کار و مطالب قبلی، در ابتدا به پیکربندی چیدمان توربین‌های بخار پرداخته و با تحلیل عملکرد اگزرژیواکونومیکی آن‌ها چیدمان مناسب معرفی می‌شوند. در ادامه به بخش دوم این پژوهش یعنی اضافه شدن دو طرح از یک سامانه توربین میعانی (کندانسی) و یا یک سامانه توربین گازی پرداخته می‌شود. در نهایت مجموع بهترین طرح شامل چیدمان کارآمد توربین‌های بخار فشار برگشتی به‌اضافه‌ی بهترین طرح جانبی از بین سامانه توربین گازی یا میعانی به‌عنوان طرح منتخب ارائه خواهد شد.

۳-۴- نحوه چیدمان توربین بخار بین سطوح بخار در حالت تولید همزمان کامل

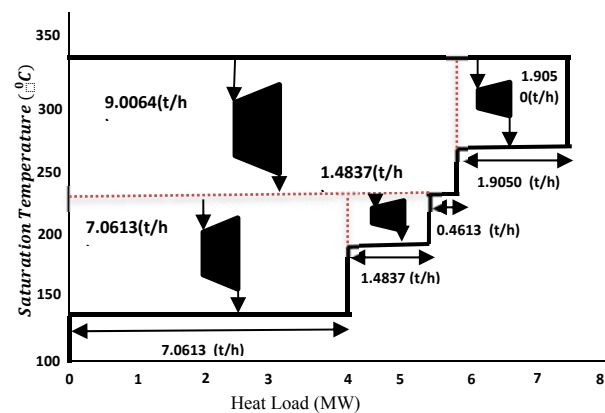
همان‌طور که در نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع پس از هدف‌گذاری به کمک الگوریتم اصلاحی IBTM، شکل (۵) مشخص گردید، چهار ناحیه بین هر دو سطح بخار وجود دارد که با اندیس $۴ = J$ نشان داده می‌شود. برای به دست آوردن توان، بین این دو سطح بخار، توربین بخار قرار می‌گیرد، شکل (۵) چیدمانی که بین هر دو سطح متوالی یک توربین بخار فشار برگشتی موجود است را نشان می‌دهد. اگر قرار بر تولید همین میزان توان باشد، می‌توان چیدمان‌های متنوعی از توربین‌های بخار با همین میزان توان تولیدی را پیشنهاد نمود و چیدمان بهینه را کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزرژی انتخاب نمود. در شکل‌های (۶) تا (۹) سناریوهای مختلفی از چیدمان‌های مختلف توربین‌های بخار مطرح می‌شود. در تمامی این چیدمان‌ها نسبت توان به بار حرارتی برابر $R=۰/۲۶۳$ می‌باشد [۱۱].



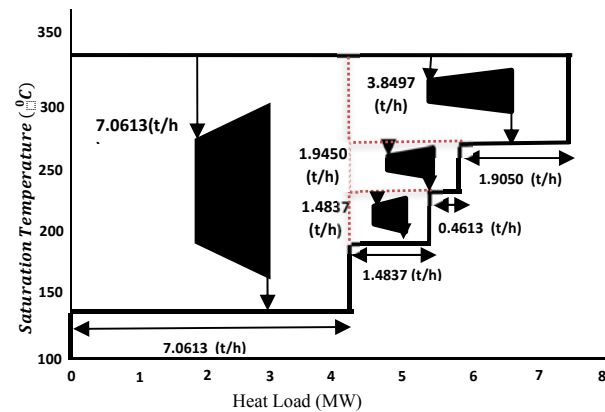
شکل ۶- نحوه چیدمان توربین‌ها در سناریوی اول



شکل ۷- نحوه چیدمان توربین ها در سناریوی دوم

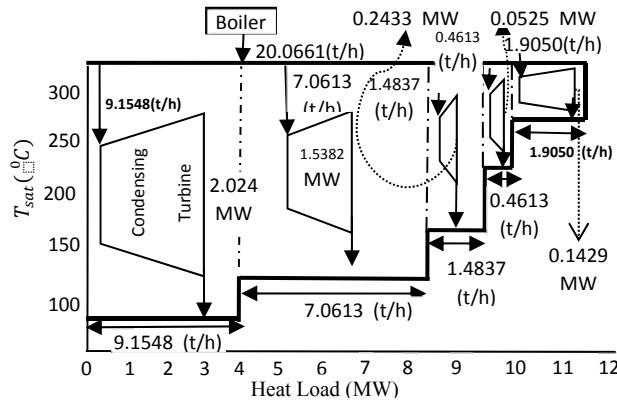


شکل ۸- نحوه چیدمان توربین ها در سناریوی سوم

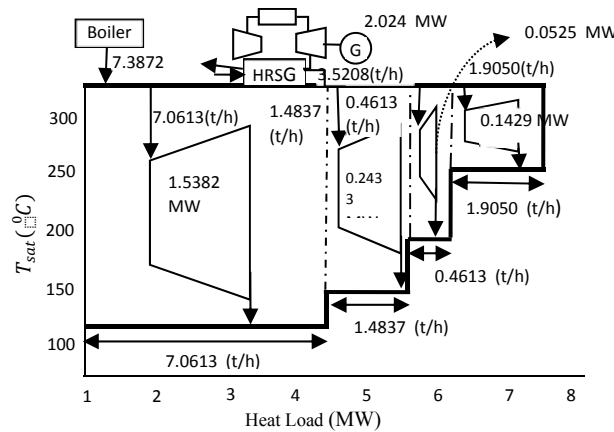


شکل ۹- نحوه چیدمان توربین ها در سناریوی چهارم

۳-۵- انتخاب بهترین چیدمان تجهیزات جهت تأمین توان اضافی بر توان تولید همزمان کامل پالایشگاه اگر تقاضای توان پالایشگاه به فرض مقدار ۴ MW باشد، این مقدار توان با توان تولیدی توربین های بخار بین سطوح یعنی توان تولید همزمان کامل تأمین نمی گردد. از این رو، طرح استفاده از توربین کندانسی یا طرح بهره برداری از سامانه توربین گازی و یا حتی ترکیبی از این دو برای تأمین توان اضافی واحد بررسی می گردد.



شکل ۱۰- سناریوی اول برای تولید توان اضافی مورد نیاز پالایشگاه برای مورد مطالعاتی



شکل ۱۱- سناریوی دوم برای تولید توان اضافی مورد نیاز پالایشگاه برای مورد مطالعاتی

یعنی می‌توان یک سناریو با در نظر گرفتن توربین کندانسی، شکل (۱۰) و سناریوی دیگری با در نظر گرفتن توربین گازی، شکل (۱۱) مطرح کرد و تحلیل اگزورژواکونومیک را در این دو حالت بررسی نمود. در نهایت سناریویی که کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزورژی را داشته باشد به‌عنوان بهترین سناریو انتخاب می‌شود. در شرایط مساوی برای هر دو سناریو، یعنی در توان تولیدی و حرارت تولیدی یکسان که نسبت R برای هر دو سناریو ۰/۵۳۲ می‌باشد نتایج حاصل از بررسی این دو طرح کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزورژی را برای سناریوی دوم، شکل (۱۱)، یعنی استفاده از سامانه توربین گازی را نشان می‌دهد. برای این دو طرح، در تحقیقی که توسط قاضی و همکاران [۱۱] از دیدگاه تئوری ساختاری صورت گرفت، نتایجی مشابه، یعنی سناریوی دوم را چیدمان مناسب تری برای سامانه تولید همزمان پالایشگاه نشان داد.

۴- نتایج و بحث

عصر امروز عصر رقابت اقتصادی است که تولید کننده و مصرف کننده هر دو به دنبال محصول با کیفیت بالاتر و قیمت تمام شده پایین تر هستند که این جز با بررسی و بهینه سازی همزمان انرژی و جزئیات اقتصادی فرآیندهای تولیدی میسر نخواهد بود. در نتیجه این مهم ما را به این امر وامی دارد که بیشتر به سمت و سوی بهینه مصرف کردن انرژی قدم برداریم. پس باید مکان هایی که پتانسیل بهینه سازی در آنها وجود دارد را جستجو کرد و با بررسی همه جانبه در سطح اجزاء سیستم و با روشهایی مناسب به طرح بهینه که در برگزیده اهداف صرفه جویی در مصرف انرژی و یا اقتصادی می باشد دست پیدا کرد. تحلیل انرژی، ابزاری مناسب ولی پیچیده تری برای درک بهتر فرآیندها می باشد و می توان از طریق این ابزار به بررسی سطح پایداری یک سامانه پرداخت. در بخش هایی که جریان جرم از حجم کنترل خارج می شود، اتلافات انرژی وجود دارد. با مطالعه این نقاط می توان به بررسی ناکارآمدی های سیستم پرداخت و از اتلاف هزینه های عملیاتی از قبیل سوخت و آب جلوگیری کرد. مطالعه تخریب انرژی و مقایسه این پارامتر در تجهیزات، می تواند به کاهش هزینه های سرمایه گذاری و تجهیزات کمک شایانی نماید. بنابراین، در کاربردهای طراحی، تحلیل انرژی برای برآورد، مقایسه، توسعه یا بهینه سازی سامانه های انرژی ابزار مفیدی می باشد و می توان، کیفیت فرایند انتقال حرارت را بررسی نمود. الگوریتم روش جدید برای هدف گذاری همزمان حرارت و توان در یوتیلیتی سایت جامع با دقتی بالا از سایر روش ها توسط قاضی و همکاران [۱۱] توسعه داده شده است. در این روش، اصلاحی بر فرایند تکرار شونده پایین به بالا، که توسط فنادزاده و همکاران [۹] ارائه گردید، صورت گرفت. بدین ترتیب که در روش اصلاحی جدید بازده ایزنتروپیک در هر مرحله، متغیر در نظر گرفته شده و این بازده متغیر در الگوریتم تکرار شونده لحاظ می شود. بنابراین دقت محاسبات توان تولیدی توربین های بخار، دمای مافوق گرم سطوح و بار حرارتی بویلر با استفاده از روش اصلاحی بیشتر می شود.

در این مقاله، یک مورد مطالعاتی جهت بررسی کاربردی تحلیل انرژی و اکونومیکی مورد استفاده قرار گرفت. مورد مطالعاتی شامل چهار سناریو از چیدمان توربین های بخار فشار برگشتی هر کدام شامل چهار توربین با چیدمان های متفاوت با مجموع توان تولیدی ۱۹۷۶ کیلووات را به عنوان هدف گذاری توان و بار حرارتی ورودی به میزان ۶۷۱۱/۴ کیلو وات را به عنوان هدف گذاری حرارت مورد نیاز سامانه های یوتیلیتی جانبی تامین نمودند، و در صورت نیاز جهت تولید ۲ مگاوات توان اضافی، دو طرح استفاده از یک توربین کندانسی و سامانه توربین گازی پیشنهاد شد، که هدف گذاری توان در توربین کندانسی و توربین گازی، هر کدام با توان تولیدی ۲۰۲۴ کیلووات بودند. در این مورد مطالعاتی با توجه به ثابت بودن ورودی بار حرارتی به خطوط فشار و تولید توان ثابت در هر چهار سناریو و همچنین ثابت بودن دما و فشار خطوط فشار، نتایج حاصل از تحلیل توربین های بخار فشار برگشتی نشان داد که هر چهار سناریو دارای بازدهی انرژی و تخریب انرژی به ترتیب ۸۲ درصد و ۲۹۰ کیلووات می باشند. از اینرو می توان از هر یک از سناریوها برای استفاده ترکیبی در کنار طرح های جانبی جهت تولید توان اضافی استفاده کرد. جدول (۱)، نتایج حاصل از تحلیل انرژی سناریوهای چیدمان توربین های بخار فشار برگشتی را نشان می دهد. در صورت نیاز جهت تولید ۲ مگاوات توان اضافی، دو طرح استفاده از یک توربین کندانسی و سامانه توربین گازی با نسبت R یکسان پیشنهاد شد.

که در این مورد مطالعاتی تولید توان اضافی توسط توربین کندانسی به میزان ۲۰۲۴ کیلووات بوده و این توربین تمام بخار ورودی به خط فشار بسیار بالا را پس از تولید توان به آب متراکم تبدیل می‌کند. به این ترتیب که بازدهی اگزرژی و تخریب توربین کندانسی به ترتیب برابر با ۵۰ درصد و ۱۹۵۷ کیلووات برآورد شد. در جدول (۲) مشخصات توربین کندانسی برای مورد مطالعاتی به همراه تحلیل اگزرژی نشان داده شده است. یک سامانه توربین گازی در این مورد مطالعاتی جهت تولید توان مورد نیاز اضافی ۲۰۲۴ کیلووات مورد بررسی قرار گرفت و مقداری از دبی بخار ورودی به خط فشار بسیار بالا از طریق سامانه مولد بازیاب حرارتی از نوع (مشعل دار) تامین می‌گردد.

در سامانه توربین گازی بازدهی اگزرژی و تخریب توربین گازی به ترتیب برابر با ۷۷ درصد و ۱۵۹۱ کیلووات برآورد شد. در جدول (۳)، مشخصات سامانه توربین گازی برای مورد مطالعاتی به همراه تحلیل اگزرژی نشان داده شده است.

جدول ۱- نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی سناریوهای چیدمان توربین‌های بخار

مقدار	واحد	مشخصه
۱۴۳/۳	kW	\dot{W}_1
۵۲/۱	kW	\dot{W}_2
۲۴۳/۳	kW	\dot{W}_3
۱۵۳۷/۳	kW	\dot{W}_4
۱۹۷۶	kW	$\Sigma \dot{W}$
۳/۰۳	kg/s	$\dot{m}_{st.VHP}$
۰/۲۰۵	kg/s	\dot{m}_{fuel}
۹۴۹۰	kW	\dot{Q}_{Boiler}
۶۲۱۰	kW	\dot{Q}_{VHP}
۱۱۴۹/۴	kW	$\dot{Q}_{net \cdot HP}$
۲۸۰/۱	kW	$\dot{Q}_{net \cdot MP2}$
۹۱۴/۹	kW	$\dot{Q}_{net \cdot MP1}$
۴۳۶۶/۸	kW	$\dot{Q}_{net \cdot LP}$
۶۷۱۱/۴	kW	$\Sigma \dot{Q}_{net}$
۱۰۶۰۰	kW	$\dot{E}x_{fuel}$
۲۹۰	kW	$\Sigma \dot{E}x_{Dest}$
۸۲	%	$\eta_{ex.total}$

جدول ۲- نتایج حاصل از تحلیل انرژی توربین کندانسی

مقدار	واحد	مشخصه
۲۰۲۴	kW	توان تولیدی
۱۸۹۴۹/۱	kg/sec	بار حرارتی بویلر
۲/۶	kg/sec	دبی بخار
۰/۴۱۰۶	kg/sec	دبی سوخت بویلر
۳۹۸۶/۹	kW	انرژی ورودی
۴/۹	kW	انرژی خروجی
۲۱۰۹۸/۱	kW	انرژی سوخت
۱۹۵۷	kW	تخریب انرژی
۵۰	%	بازدهی انرژی

جدول ۳- مشخصات نقاط مختلف سامانه توربین گازی

\dot{E}_x [kW]	P [bar]	T [k]	\dot{m} [kg/s]	نوع جریان	نقاط
۲۸۱/۷۷	۱/۰۱۳	۲۹۸/۱۵	۳/۲۷۹۸	هوا	۱
۲۴۱۳/۱	۸/۱۰۴	۵۴۰	۳/۲۷۹۸	هوا	۲
۵۵۲۰/۸	۸/۷	۱۳۰۰	۳/۳۴۹۸	محصولات احتراق	۳
۱۹۰۵/۵	۳/۶۷	۷۷۰	۳/۳۴۹۸	محصولات احتراق	۴
۲۱۲۴/۲	۱/۰۶۶	۱۰۹۸/۱	۳/۴۴۳۱	محصولات احتراق	۵
۴۱۶/۲۹	۱/۰۱۳	۴۴۸/۱۵	۳/۴۴۳۱	محصولات احتراق	۶
۸۲/۶۹۴	۲۰/۰۰	۴۰۳/۱۵	۲/۰۵۲	آب	۷
۲۸۳۴	۲۰/۰۰	۸۸۶/۷۵	۲/۰۵۲	بخار	۸
۵۹۲۴/۵	۹/۰۰۰	۲۹۸/۱۵	۰/۰۹۳	متان	۹
۳۷۰۸/۵	۹/۰۰۰	۲۹۸/۱۵	۰/۰۷	متان	۱۰

جدول ۴- مقایسه بازدهی‌ها و اگزرژی تخریبی طرح‌های پیشنهادی کلی

طرح‌های پیشنهادی	$\eta_{ex}[\%]$	$\dot{E}_{Dest.total} [kW]$
توربین گازی + توربین‌های بخار	۸۳	۱۸۸۱/۳
توربین کندانسی + توربین‌های بخار	۷۹	۲۲۴۷/۹

در جدول (۴) مقایسه بازدهی‌ها و اگزرژی تخریبی طرح‌های پیشنهادی کلی برای مورد مطالعاتی نشان داده شده است، که با توجه به نتایج بدست آمده در این جدول، ترکیب سیستم توربین گازی با چیدمان توربین‌های بخار نسبت به نوع کندانسی، دارای بهترین بازدهی اگزرژی و کمترین میزان تخریب اگزرژی می‌باشند. بیشترین هزینه‌های سرمایه گذاری مربوط به هزینه‌های خرید توربین بخار، بویلر، مجموعه توربین گازی و مولد بازیاب حرارتی می‌باشد. هزینه‌های عملکردی شامل هزینه‌های مربوط به سوخت، آب و برق در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه قیمت تجهیزات اصلی موجود در یوتیلیتی سایت جامع در این پژوهش مانند بویلر، توربین بخار و توربین گاز که هر کدام دارای هزینه‌های خاصی هستند و معمولاً به صورت یک تابع ارائه می‌گردند و این هزینه‌ها بر اساس توابع قیمت تعیین می‌شوند.

یکی از مهمترین جنبه‌های تعیین هزینه اگزرژی، محاسبه هزینه نرخ تخریب اگزرژی در هر یک از اجزای سیستم انرژی مورد بررسی می‌باشد. برای اغلب تجهیزاتی که به خوبی طراحی شده باشند هر چه میزان تخریب اگزرژی کاهش و یا به عبارتی راندمان افزایش یابد، هزینه نرخ تخریب اگزرژی کاهش یافته و در مقابل هزینه سرمایه گذاری اولیه افزایش می‌یابد. یعنی می‌توان گفت هر چه هزینه نرخ تخریب اگزرژی بیشتر باشد هزینه نرخ سرمایه گذاری کمتر خواهد بود و بالعکس. این مطلب یکی از جالب‌ترین مفاهیم اگزژیواکونومیک می‌باشد که هزینه تخریب اگزرژی برای یک جزء تخمین زده شده و با هزینه‌های سرمایه گذاری همان جزء مقایسه می‌گردد. این مقایسه تصمیم گیری درباره تغییرات مورد نیاز در طراحی که منجر به بهبود کارایی اقتصادی کل سیستم می‌شود را میسر می‌سازد. در بهینه سازی اگزژیواکونومیک ما سعی می‌کنیم که بهترین تعادل بین \dot{Z}_K و $\dot{C}_{D,K}$ را بیابیم. هزینه نرخ تخریب اگزرژی برای کل سیستم، از حاصلضرب هزینه متوسط به ازای واحد اگزرژی سوخت کل سیستم و نرخ تخریب اگزرژی کل سیستم بدست می‌آید.

در جدول (۵) نیز محاسبات مربوط به، تابع قیمت، هزینه نرخ تخریب اگزرژی، هزینه نرخ سرمایه گذاری و همچنین مجموع هزینه نرخ سرمایه گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزرژی برای تجهیزات به کار رفته در طرح نشان داده شده است. به دلیل تابع هدف بودن هزینه و تلاش برای کاهش آن، میزان هزینه نرخ تخریب اگزرژی درک بهتری برای تصمیم گیری می‌دهد. همچنین همیشه پایین بودن میزان تخریب اگزرژی به معنای پایین بودن هزینه تخریب اگزرژی نیست. به همین دلیل میزان هزینه نرخ تخریب اگزرژی برای پیدا کردن و تصمیم برای اصلاح، دید بهتری برای اولویت دهی تجهیزات می‌دهد.

جدول ۵- نتایج محاسبات اگزروزاکونومیکی

نام تجهیزات	توربین گاز + مبدل حرارتی	توربین کندانسی + بوiler	توربینهای بخار + بوiler
$Z_K(1000\$)$	۲۰۳۹/۱	۲۱۹۳/۱	۲۱۹۵/۶
$\dot{C}_{D,K}(\frac{\$}{hr})$	۱۲۷/۳	۳۵۶/۸	۱۱۲/۶
$\dot{Z}_K(\frac{\$}{hr})$	۴۹/۴	۵۱/۶	۵۱/۷
$(\dot{Z}_K + \dot{C}_{D,K})(\frac{\$}{hr})$	۱۷۶/۷	۴۰۸/۴	۱۶۴/۲

جدول ۶- محاسبه‌ی مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزروژی برای تأمین توان اضافی

نام تجهیزات	$(\dot{Z}_K + \dot{C}_{D,K})(\frac{\$}{hr})$
توربین کندانس+ توربین های بخار	۵۷۲/۶
توربین گازی+ توربین های بخار	۳۴۰/۹

نتایج محاسبه‌ی مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزروژی برای تأمین توان اضافی، برای مورد مطالعاتی در جدول (۶) نشان داده شده است، که طبق نتایج به دست آمده، جهت تعیین چیدمان بهینه از دیدگاه اگزروزاکونومیک، ترکیب سیستم توربین گازی با چیدمان توربین‌های بخار دارای کمترین مقدار مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزروژی نسبت به نوع کندانسی می‌باشند، که همین امر لزوم استفاده از این سیستم از لحاظ اگزروزاکونومیکی را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی یک مورد مطالعاتی پرداخته شد، که شامل چهار سناریو هر کدام با چهار توربین با چیدمان‌های متفاوت با مجموع توان تولیدی ۱۹۷۶ کیلووات بود. بار حرارتی مورد نیاز سیستم تولید همزمان به میزان ۶۷۱۱/۴ کیلووات در خروجی توربین‌های بخار تولید شد. در صورت نیاز به تولید توان اضافی، از دو طرح توربین کندانس و توربین گازی، هر کدام با توان تولیدی ۲ مگاوات مورد استفاده قرار گرفت. محاسبات برای سیستم تولید همزمان حرارت و توان برای چیدمان تجهیزات در سناریوهای مختلف انجام شد، با توجه به نتایج به دست آمده، تفاوت‌ها در میزان مجموع هزینه نرخ سرمایه‌گذاری و هزینه نرخ تخریب اگزروژی و نیز بازدهی اگزروژیکی سیستم بود که در نهایت، استفاده ترکیبی از چیدمان منتخب توربین‌های بخار فشار برگشتی در کنار سامانه توربین گازی، از دیدگاه اگزروزاکونومیکی به عنوان بهترین چیدمان پیشنهاد شدند.

مراجع

- [1] Raissi, K., "Total Site Integration", Ph.D. Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, Department of Process Integration, Manchester, UK, (1994).
- [2] Klemes, J., "*Sustainability in the Process Industry*", McGraw-Hill, New York, (2011).
- [3] Klemeš, J., Dhole, V.R., Raissi, K., Perry, S.J., and Puigjaner, L., "Targeting and Design Methodology for Reduction of Fuel, Power and CO₂ on Total Sites", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, No. 8-10, pp. 993-1003, (1997).
- [4] Smith, R., "*Chemical Process: Design and Integration*", John Wiley, West Sussex, (2005).
- [5] Meckler, M., and Hyman, L.B., "*Sustainable On-site CHP Systems*", McGraw-Hill, New York, (2010).
- [6] Dueblin, D., and Steinhauser, A., "Utilization of Biogas for the Generation of Electric Power and Heat", WILEY-VHC, (2008).
- [7] Dhole, V. R., and Linnhoff, B., "Total Site Targets for Fuel, Co-generation, Emissions, and Cooling", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 17, pp. 101-109. (1993).
- [8] Walmsley, T.G., Varbanova, P.S., Philipp, M., and Klemeš, J.J., "Total Site Utility Systems Structural Design Considering Electricity Price Fluctuations", *Computer Aided Chemical Engineering*. Vol. 44, pp. 1159-1164, Elsevier, (2018).
- [9] Ghannadzadeh, A., Perry, S., and Smith, R., "Cogeneration Targeting for Site Utility Systems", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 43, pp. 60-66, (2012).
- [10] Kapil, A., Bulatov, I., Smith, R., and Kim, J.K., "Site-wide Low-grade Heat Recovery with a New Cogeneration Targeting Method", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 90, No. 5, pp. 677-689, (2012).
- [11] Ghazi, M., Amidpour, M., Abbaspour, M., and Farzaneh, H., "Developing of Constructal Theory Concept to the Total Site Cogeneration Heat and Power Retrofit", *International Journal of Exergy*, Vol. 17, No. 2, pp. 171-191, (2015).
- [12] Khoshgoftar Manesh, M.H., Abadi, S. K., Amidpour, M., and Hamed, M. H., "A New Targeting Method for Estimation of Cogeneration Potential and Total Annualized Cost in Process Industries", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 91, No. 6, pp. 1039-1049, (2013).
- [13] Khoshgoftar Manesh, M.H., Navid, P., Baghestani, M., Abadi, S. K., Rosen, M. A., Blanco, A. M., and Amidpour, M., "Exergoeconomic and Exergoenvironmental Evaluation of the Coupling of a Gas Fired Steam Power Plant with a Total Site Utility System", *Energy Conversion and Management*, Vol. 77, pp. 469-483, (2014).

- [14] Khoshgoftar Manesh, M.H., Amidpour, M., Abadi, S. K., and Hamed, M. H., "A New Cogeneration Targeting Procedure for Total Site Utility System", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 54, No. 1, pp. 272-280, (2013).
- [15] Varbanov, P. S., Doyle, S., and Smith, R., "Modelling and Optimization of Utility Systems", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 82, No. 5, pp. 561-578, (2004).
- [16] Ahmadi, P., Dincer, I., and Rosen, M. A., "Exergy, Exergoeconomic and Environmental Analyses and Evolutionary Algorithm Based Multi-objective Optimization of Combined Cycle Power Plants", *Energy*, Vol. 36, No. 10, pp. 5886-5898, (2011).
- [17] Ameri, M., and Enadi, N., "Thermodynamic Modeling and Second Law Based Performance Analysis of a Gas Turbine Power Plant (Exergy and Exergoeconomic Analysis)", *Journal of Power Technologies*, Vol. 92, No. 3, pp. 183-191, (2012).
- [18] Shayan, E., Zare, V., and Mirzaee, I., "On the use of Different Gasification Agents in a Biomass Fueled SOFC by Integrated Gasifier: A Comparative Exergo-economic Evaluation and Optimization", *Energy*, Vol. 171, pp. 1126-1138, (2019).
- [19] Dev, N., Kachhwaha, S.S., and Attri, R., "Exergy Analysis and Simulation of a 30MW Cogeneration Cycle", *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 169-180, (2013).
- [20] Pirmohamadi, A., Ghazi, M., and Nikian, M., "Optimal Design of Cogeneration Systems in Total Site using Exergy Approach", *Energy*, Vol. 166, pp. 1291-1302, (2019).
- [21] Ameri, M., Ahmadi, P., and Hamidi, A., "Energy, Exergy and Exergoeconomic Analysis of a Steam Power Plant: A Case Study", *International Journal of Energy Research Int. J. Energy Res*, Vol. 33, pp. 499-512, (2009).
- [22] Dejan, M., Stojanović, B., Jelena, J., and Ignjatović, M. G., "Exergy and Exergoeconomic Analysis of a Steam Boiler", *Thermal Science, Suppl. Vol. 22, Vol. 5*, pp. 1601-1612, (2018).
- [23] Unal, F., and Ozkan, D., "Application of Exergoeconomic Analysis for Power Plants", *Thermal Science Vol. 22 .6 Part A*, pp. 2653-2666, (2018).
- [24] Valencia Ochoa, G., Piero Rojas, J., and Duarte Forero, J., "Advance Exergo-economic Analysis of a Waste Heat Recovery System using ORC for a Bottoming Natural Gas Engine", *Energies*, Vol. 13, No. 1, pp. 267, <https://doi.org/10.3390/en13010267>, (2020).
- [25] Bejan, A., and Tsatsaronis, G., "*Thermal Design and Optimization*", John Wiley & Sons, New York, (1996) .
- [26] Shamsi, S., and Omidkhan, M. R., "Optimization of Steam Pressure Levels in a Total Site using a Thermo-economic Method", *Energies*, Vol. 5, No. 3, pp. 702-717, (2012).
- [27] Morales, O.A., "Design and Optimisation of Flexible Utility Systems", PhD Thesis, Manchester University, Manchester, UK, (2005).

فهرست نمادهای انگلیسی

هزینه‌ی نرخ تخریب انرژی، (KW)	\dot{C}_D
هزینه سوخت در واحد انرژی، (\$/MJ)	$C_{f,k}$
فاکتور بازگشت سرمایه	CRF
تخریب	D
نرخ تخریب انرژی، (KW)	$\dot{E}_{X,DEST}$
نرخ انرژی، (KW)	\dot{E}_X
انرژی مخصوص، (kJ/kg)	ex
فشار بالا	HP
مولد بازیاب حرارتی	HRSG
آنتالپی مخصوص، (kJ/kg)	h
نرخ بهره	i
جزء K	K
ارزش حرارتی پایین سوخت، (kJ/kg)	LHV_f
فشار پایین	LP
فشار متوسط	MP
دبی جرمی سوخت، (kg/s)	\dot{m}_{Fuel}
دبی جرمی بخار فشار بالا، (kg/s)	$\dot{m}_{st.VHP}$
بار حرارتی بویلر، (KW)	\dot{Q}_{BOILER}
بار حرارتی خالص فشار بالا، (KW)	$\dot{Q}_{NET \cdot HP}$
بار حرارتی خالص فشار پایین، (KW)	$\dot{Q}_{NET \cdot LP}$
بار حرارتی خالص فشار متوسط ۱، (KW)	$\dot{Q}_{NET \cdot MP1}$
بار حرارتی خالص فشار متوسط ۲، (KW)	$\dot{Q}_{NET \cdot MP2}$
بار حرارتی با فشار خیلی زیاد، (KW)	\dot{Q}_{VHP}
آنتروپی مخصوص، (kJ/kg K)	S
نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع	SUGCC
دما، (°C or K)	T
فشار بسیار بالا	VHP
توان تولیدی توربین ۱، (KW)	\dot{W}_1
توان تولیدی توربین ۲، (KW)	\dot{W}_2
توان تولیدی توربین ۳، (KW)	\dot{W}_3
توان تولیدی توربین ۴، (KW)	\dot{W}_4
تابع قیمت، (\$)	ZK

هزینه نرخ سرمایه‌گذاری ($\$/hr$)	\dot{Z}_k
تابع هدف، ($\$/hr$)	$\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}$

نمادهای یونانی

بازده انرژی، (%)	η_{ex}
نسبت انرژی و انرژی شیمیایی	ζ
ضریب نگهداری تجهیزات	φ

Abstract

In designing and analysis of total site of heat and power cogeneration, how to arrange equipment has a unique importance in the production process. Suitable design of these arrangements can save, or conversely, create unjustified extra costs. In this paper, first, using an Iterative Bottom-to-Top Model (IBTM) which is a new modified cogeneration targeting method, the steam turbines arrangement between the steam levels for the case study is designated and then if the required power is not provided in total site by the steam turbines, use of gas turbine or condensing turbine to generate additional power are considered. The results of the research showed that the selected scenario of the back pressure steam turbines arrangement beside the gas turbine system, had 83% exergy efficiency, 1881.3 Kilo Watts exergy destruction, total capital cost rate and exergy destruction cost rate of 340.9 dollar per hour. Finally, the mixed use of back pressure steam turbines beside the gas turbine system is suggested as the best arrangement from an exergoeconomic approach.