

مروری بر توسعه کاربرد مفاهیم اکسرژی در ارزیابی عملکرد فرآیندهای صنعتی و تجهیزات عملیاتی

سمانه سامی¹، نسرین اعتصامی^{2*}، امیر رحیمی³

¹ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

² دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

³ استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت: 93/3/21 پذیرش: 95/12/1

چکیده

امروزه با پیشرفت صنایع و افزایش نیاز بشر به بهره‌برداری از منابع انرژی، تلاش برای بهینه‌سازی مصرف انرژی به یک هدف اصلی تبدیل گردیده است. آشنایی با یکی از مهمترین ابزار این کار می‌تواند در توسعه آن سودمند واقع شود. تحلیل فرآیندها به کمک برقراری موازنه اکسرژی¹ سیستم در دهه اخیر، بیش‌ترین کاربرد را در شناسایی اتلافات انرژی و کمک به بالا بردن بازده داشته است. فقدان تاریخچه جامعی از روند توسعه این مفهوم، روابط اکسرژی موجود در شکل‌های مختلف جریان، موازنه اکسرژی و نحوه محاسبه بازدهی فرآیند به شکل‌های مختلف به ضرورت دیده می‌شود. بدین ترتیب در این مقاله تلاش گردیده تا به گردآوری این تاریخچه، بررسی اجمالی و مفید مفهوم اکسرژی و اهمیت و نقش آنالیز اکسرژی در طراحی و توسعه فرآیندهای پایا به کمک تعدادی مطالعات موردی صنعتی و عملی پرداخته شود. و بدین ترتیب توانایی محاسبه و آنالیز اکسرژی به کمک روابط موجود به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: اکسرژی، بازدهی اکسرژی، بهینه‌سازی، برگشت‌ناپذیری

مقدمه

رانت² در سال 1953 واژه اکسرژی را به منظور مشخص کردن ظرفیت کارکرد یک سیستم پیشنهاد نمود. وی در سال 1956 نیز به منظور بحث در مورد نام‌های معادل بین‌المللی، برای این کمیت مقاله‌ای ارائه نمود. با این وجود 50 سال طول کشید تا در جوامع علمی مرتبط این کمیت به عنوان یک کمیت قابل پذیرش

* netesami@cc.iut.ac.ir

¹ Exergy

² Rant



بیان شود. حتی در حال حاضر نیز برخی محققین آمریکایی همچنان از اصطلاح دسترس‌پذیری¹ استفاده می‌کنند. تعریف علمی واژه اکسرژی اولین بار توسط گیبس² ارائه گردید: اکسرژی یک سیستم ترمودینامیکی در شرایط وجود، حداکثر کار مفیدی است که به دست می‌آید، اگر سیستم توسط فرآیندهای ایده‌آل (برگشت‌پذیر) به شرایط تعادل با محیط برسد. در سال 1962 تعریف دیگری توسط بائر³ ارائه گردید که هنوز در مباحث بازدهی انرژی استفاده می‌شود. وی اعلام کرد که اکسرژی بخشی از انرژی است که به طور کامل قابل تبدیل به شکل‌های مختلف انرژی باشد. این تعریف کمی متمایز از تعاریف دیگر بود زیرا مطابق با آن انرژی در یک سیستم به دو بخش قابل تبدیل (اکسرژی) و غیرقابل تبدیل (انرژی)⁴ تقسیم می‌شود. این در حالی است که مثال‌های مختلف از سیستم‌هایی وجود دارند که دارای انرژی منفی خواهند بود [1].

در سال 1970، در ایالت متحد آمریکا، حدود 50 مقاله در زمینه اکسرژی و با مفهوم انرژی قابل دسترس ارائه شد، که در سال 2004، این تعداد به بیش از 500 مقاله رسیده است. تمامی مجلات مهم انرژی در هر شماره خود به طور میانگین 1 یا 2 مقاله در زمینه اکسرژی به چاپ می‌رسانند. از سال 2000، به طور اختصاصی یک مجله بین‌المللی در زمینه اکسرژی به چاپ می‌رسد. بسیاری از کتاب‌های ترمودینامیکی حداقل یک فصل خود را به این موضوع اختصاص می‌دهند. می‌توان گفت که امروزه در تحلیل‌های مهندسی و صنعتی، اکسرژی را به عنوان یک پارامتر اساسی مورد سنجش قرار می‌دهند. قانون اول ترمودینامیک قادر به لحاظ کردن تغییرات کیفیت انرژی در طول یک فرآیند نمی‌باشد، این امر ناکافی بودن روش‌های رایج را جهت تحلیل فرآیندها مشخص می‌سازد. برای منظور کردن کیفیت متفاوت انواع انرژی در تحلیل واحدهای شیمیایی و حرارتی یک استاندارد جهانی کیفیت لازم است، این استاندارد برابر بیشینه کار مفیدی است که از انرژی موجود (به هر شکل و کیفیت) بر مبنای یک حالت پایه مربوط به پارامترهای محیطی (به عنوان حالت مرجع) قابل دستیابی و تبدیل است. این استاندارد کیفیت انرژی، "اکسرژی" نامیده می‌شود. در سال - های اخیر دو مفهوم اساسی "اکسرژی" و "بازگشت‌ناپذیری" به عنوان تکنیک‌ها و معیارهای عملی مطرح شده‌اند [2]. یکی از اساسی‌ترین کاربردهای این مفهوم، موازنه اکسرژی در تحلیل سیستم‌های حرارتی است. موازنه اکسرژی معادل موازنه انرژی است، ولی یک تفاوت اساسی با آن دارد. موازنه انرژی یک بیان از قانون بقای انرژی می‌باشد، در حالی که موازنه اکسرژی بیانی از قانون کاهش سطح انرژی است. کاهش سطح انرژی در اثر اتلاف غیرقابل بازیافت اکسرژی به علت بازگشت‌ناپذیری موجود در تمامی فرآیندهای واقعی ایجاد می‌شود. هر چه فرآیند برگشت‌ناپذیرتر باشد، نیرو محرکه بیش‌تری دارد، بنابراین سرعت فرآیند بیش‌تر ولی بازده آن کاهش می‌یابد.

پیش از این تصور می‌شد تنها با کارآمد کردن تک تک فرآیندهای یک سیستم می‌توان به‌ترین شرایط عملکرد سیستم را به دست آورد. اما بررسی اثر متقابل فرآیندها و تاثیر آنها بر یکدیگر و بر کل سیستم، به

¹ Availability

² Gibbs

³ Baehr

⁴ Anergy

کارآمدتر شدن سیستم منجر می‌شود. این روش دو قسمت دارد: ابزار تحلیلی که اکسرژی و ابزار کاربردی که پینچ¹ نامیده شده است. اکسرژی بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک و پینچ بر مبنای قانون اول ترمودینامیک می‌باشد [3]. روش اکسرژی یک راهکار برای آنالیز ترمودینامیکی فرآیندهاست که به طور تقریبی به صورت اندازه‌گیری پتانسیل جهانی کار یا کیفیت شکل‌های مختلف انرژی در ارتباط با یک محیط تعریف می‌شود. کاربرد موازنه اکسرژی بیان می‌دارد که چقدر از پتانسیل کار وارد شده به فرآیند بوسیله فرآیند مصرف شده است. این میزان اتلاف همان بازگشت ناپذیری است. در یک مثال کاربردی وقتی برای یک واحد صنعتی تحلیل پینچ استفاده می‌شود، اول باید موازنه اکسرژی واحد نوشته شود تا معلوم گردد چه میزان از انرژی-های موجود قابل تبدیل به یکدیگر هستند، زیرا کیفیت انرژی‌ها با هم متفاوت است. مثلاً در تماس دو جسم سرد و گرم قانون اول بیان می‌کند که کل انرژی که جسم گرم از دست می‌دهد جسم سرد دریافت می‌کند، این در حالی است که تحلیل اکسرژی بیان می‌کند تنها بخشی از آن انرژی قابل انتقال است. پس می‌توان گفت اکسرژی قابلیت تبادل انرژی را مشخص می‌کند و پینچ چگونگی آن را نشان می‌دهد. این دو روش با هم به منظور انتگراسیون انرژی فرآیند استفاده می‌شوند.

هدف اصلی در به کارگیری تحلیل فرآیند، اندازه‌گیری مقدار انرژی مورد استفاده و اتلافی خواهد بود. به عبارت دیگر می‌توان گفت تحلیل انرژی مسیر تبدیل انرژی و جایگاه کاهش انرژی را مشخص نمی‌کند. وابستگی هم‌زمان اکسرژی به قوانین اول و دوم ترمودینامیک اهمیت بررسی اکسرژی را نسبت به بررسی انرژی در سیکل‌های مختلف رجحان می‌بخشد. بدین ترتیب با ارائه مفهوم اکسرژی تحلیل دقیق فرآیندها امکان‌پذیر است. شکل‌های مختلف انرژی دارای کیفیت‌های متغیر هستند. دانش اکسرژی به ما کمک می‌کند تا این کیفیت‌ها را به خوبی تعریف کنیم و بهینه‌سازی بیلان مصرف انرژی را تحت کنترل داشته باشیم. انرژی الکتریکی و مکانیکی را می‌توان اکسرژی خالص نامید، در صورتی که انرژی گرمایی در راه تبدیل به نوع دیگر انرژی‌ها، با در نظر گرفتن حرارت اولیه سیستم و اطراف آن، ضایعاتی به همراه دارد. استفاده از تجزیه و تحلیل اکسرژی در طراحی و توسعه فرآیندهای پایدار، اطلاعات لازم را به منظور برنامه‌ریزی بلند مدت به کارگیری منابع فراهم می‌کند.

فقدان تاریخچه جامعی از روند توسعه این مفهوم در فرآیندهای مختلف، مقایسه این پارامتر با تعریف انرژی، روابط اکسرژی موجود در شکل‌های مختلف جریان، موازنه اکسرژی و نحوه محاسبه بازدهی فرآیند به شکل-های مختلف به ضرورت دیده می‌شود. در مطالعه حاضر علاوه بر تهیه این تاریخچه، اهمیت و نقش آنالیز اکسرژی در طراحی و توسعه فرآیندهای پایا به کمک تعدادی مطالعات موردی صنعتی و عملی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب توانایی محاسبه و آنالیز اکسرژی در فرآیندهای صنعتی به کمک روابط موجود در مطالعه حاضر به دست می‌آیند. این مطالعه آنچه را که تحلیل اکسرژی جدید به منظور طراحی سیستم، تجزیه و تحلیل، ارزیابی و بهبود سیستم‌های انرژی به ارمغان می‌آورد مورد بحث قرار داده است. تا بدین ترتیب شاهد کاربرد و کارایی چشمگیر این مفهوم در سیستم‌های صنعتی مختلف باشیم.

¹ Pinch



تفاوت در مفاهیم انرژی و اکسرژی

مفهوم انرژی بیانگر میزان کل انرژی‌های قابل دسترس و غیرقابل دسترس می‌باشد. اما میزان کل انرژی قابل دسترس، اکسرژی نامیده می‌شود. این دو کمیت به صورت ریاضی می‌توانند تحلیل شوند [4]:

$$\text{انرژی} = \text{آنتالپی} \times \text{شدت جریان} = Gh$$

$$\text{اکسرژی} = \text{قابلیت دسترسی}^1 \times \text{شدت جریان} = Ga$$

جریانات اکسرژی و انرژی در یک سیستم قابل محاسبه هستند. قانون بقای انرژی مشخص می‌کند که میزان انرژی ورودی و خروجی به سیستم باید معادل هم باشند. تفاوت‌های کم ناشی از اتلاف حرارتی در سیستم هستند. موازنه بر روی جریان‌های اکسرژی اجزا نشان دهنده مصرف اکسرژی می‌باشد.

این مصرف معادل تبدیل انرژی از حالت دسترس پذیر به حالت غیرقابل دسترس می‌باشد. به عبارت دیگر اکسرژی میزان اتلاف انرژی در دسترس را مشخص می‌کند. بنابراین اکسرژی قابلیت اندازه‌گیری میزان پتانسیل انجام کار در یک سیستم را خواهد داشت. اکسرژی مصرفی برای تولید مواد (یک محصول یا خدمات)، بیش‌تر از کار صورت گرفته برای ایجاد آن‌ها است.

اکسرژی به دلیل وجود این صفات می‌تواند به عنوان یک ابزار اندازه‌گیری کیفی انرژی به کار رود. اکسرژی یک ویژگی ترکیبی از یک سیستم و محیطش است زیرا بر خلاف انرژی وابسته به حالت هر دو محیط و سیستم می‌باشد [5]. اکسرژی یک سیستم در تعادل با محیط صفر خواهد بود. اکسرژی ویژگی ترمودینامیکی ماده و پتانسیل ترمودینامیکی سیستم نخواهد بود. اکسرژی و انرژی هر دو واحد ژول دارند.

انرژی داخلی یک سیستم همواره از روی یک حالت مبنای ثابت اندازه‌گیری می‌شود و بنابراین همواره یک تابع حالت است. برخی محققین تغییر در میزان اکسرژی سیستم را ناشی از تغییرات محیطی می‌دانند، که در این حالت دیگر یک تابع حالت نخواهد بود. جدول (1) تعدادی از تفاوت‌های میان انرژی و اکسرژی را مطرح می‌کند.

¹ Availability

جدول 1. خلاصه‌ای از مقایسه میان مفاهیم انرژی و اکسرژی سیستم [5]

اکسرژی سیستم	انرژی سیستم
برآورد بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک	برآورد بر مبنای قانون اول ترمودینامیک
محفوظ ماندن اکسرژی برای فرآیندهای برگشت پذیر و از بین رفتن در فرآیندهای برگشت ناپذیر	هرگز نابود نمی‌شود
کار یا توانایی انجام کار است	حرکت یا ایجاد آن
هرگز برای فرایندهای واقعی در موازنه نیست.	موازنه آن در تمامی فرآیندها برقرار است
یک معیار کمی و کیفی	یک معیار کمی
وابسته به پارامترهای محیط	مستقل از پارامترهای محیط

مفهوم کاربردی اکسرژی

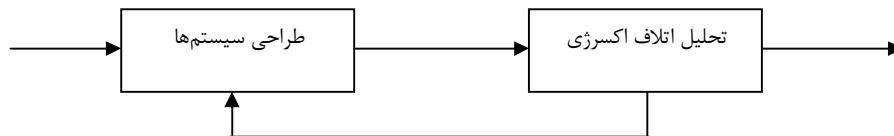
اکسرژی به عنوان حداکثر کار تئوری مفید در یک سیستم تعریف می‌شود. زمانی که فرآیند یک عملیات فیزیکی یا شیمیایی خاصی را دنبال می‌کند به دنبال آن میزان اکسرژی مربوط به جریان‌های مختلف موجود در سیستم دچار تغییرات قابل ملاحظه‌ای می‌شود. همان‌طور که شکل‌های مختلفی از انرژی وجود دارد، در مورد اکسرژی نیز به همین ترتیب است. انواع مختلف جریان‌های اکسرژی در جدول (2) نشان داده شده است.

جدول 2. انواع اکسرژی با توجه به نوع جریان مورد بررسی [5]

نوع جریان	اکسرژی ویژه	نوع جریان	اکسرژی ویژه
جنبشی	$0.5V^2$	مواد خالص شیمیایی	$\mu - \mu_0 + RT_0 \ln \left[\frac{c}{c_0} \right]$
پتانسیل	$g\Delta z$	تشعشع	$\sigma \left[T^4 - \frac{4T^3T_0}{3} + \frac{T_0^4}{3} \right]$
حرارتی	$q \left(1 - \frac{T}{T_0} \right)$	شیمیایی	$\sum_{j=1}^n v_j X_{chem.ref-j} - \Delta_r G_i^0$
مکانیکی	w	جرمی	$(h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$
الکتریکی	$It\Delta v$	اختلاط	$\Delta H_{mix} - T_0 \Delta S_{mix}$
فیزیکی	$\Delta_{actual-0} \left[F \left(\sum_{i=1}^n x_i H_i^F - T_0 \sum_{i=1}^n x_i S_i^F \right) + G \left(\sum_{i=1}^n x_i H_i^G - T_0 \sum_{i=1}^n x_i S_i^G \right) \right]$	هوای مرطوب	$x_a [\bar{h}_a - \bar{h}_a^* - T_0(\bar{s}_a - \bar{s}_a^*) + \mu_a - \mu_{a,00}] + x_v [\bar{h}_v - \bar{h}_v^* - T_0(\bar{s}_v - \bar{s}_v^*) + \mu_v - \mu_{v,00}]$

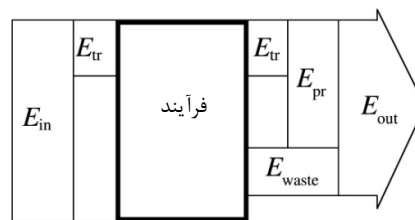
تحلیل اکسرژی فرآیندها

طراحی فرآیندها و سیستم‌های مختلف با استفاده از ارزیابی اثر پارامترهای مختلف به کمک تحلیل نتایج حاصل از بررسی اکسرژی منجر به بهینه‌سازی سیستم مورد نظر می‌شوند (شکل (1)). برای یافتن اکسرژی مصرفی در طول فرآیند مورد بررسی، لازم است که تفاوت میان جریان‌های اکسرژی ورودی و خروجی در فرایند محاسبه و بر روی دیاگرام مناسب سیستم مشخص شوند. شکل (2) نمونه‌ای از یک دیاگرام مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل (1). رابطه میان تحلیل اکسرژی با طراحی سیستم‌ها

برای فرایندهای واقعی، اکسرژی ورودی E_{in} همواره بیش‌تر از اکسرژی خروجی E_{out} است. این نابرابری ناشی از برگشت‌ناپذیری و تخریب اکسرژی نامیده می‌شود. اکسرژی خروجی از سیستم، شامل اکسرژی محصول E_{pr} و اکسرژی زائد E_{waste} خواهد بود. اما برگشت‌ناپذیری هیچگونه اثرات مستقیم زیست محیطی ندارد. اتلاف بیش از حد اکسرژی موجب نیاز به ورود اکسرژی بیش‌تر به سیستم می‌شود، که به محیط‌زیست آسیب می‌رساند [6]. میزان اکسرژی در فرآیند که بدون تغییر باقی‌می‌ماند E_{tr} است. این میزان اکسرژی به همان شکل که وارد سیستم شده به همان طریق خارج می‌شود.



شکل 2. اکسرژی‌های ورودی و خروجی به یک سیستم [6]

از نمایش دیاگرام مربوط به ورود، خروج و یا اتلاف اکسرژی در هر سیستم اطلاعات با ارزشی قابل استخراج خواهد بود. از هر دیاگرام جریان اکسرژی می‌توان موارد زیر را به‌دست آورد:

- بازدهی‌های اکسرژی فرآیندهای مختلف یک سیستم
- تفاوت اکسرژی ورودی و خروجی
- منشا جریانات ورودی و خروجی اکسرژی
- اکسرژی انتقال یافته

- تخریب اکسرژی در هر فرایند

بیان ریاضی مفهوم اکسرژی و تغییرات آن

اکسرژی به عنوان یک تابع حالت می‌تواند مانند آنتالپی در هر سیستمی مورد موازنه قرار گیرد و مقدار اکسرژی تلف شده در هر فرآیند مورد بررسی قرار گیرد. در سال‌های اخیر متخصصان از تحلیل اکسرژی برای ایجاد مدل‌های ریاضی که بتواند کارایی فرایندها را توجیه و تفسیر کند، استفاده کرده‌اند [7-11]. آنچه که مهم است این است که در برخی فرایندها مانند احتراق و تبادل حرارتی ممکن است تغییرات انرژی و اتلاف آن وجود نداشته باشد ولی تغییرات اکسرژی قابل ملاحظه‌ای وجود داشته باشد و این امر به دلیل آن است که در این تحولات اگر چه انرژی کل ثابت می‌ماند ولی اکسرژی به انرژی تبدیل می‌گردد. نکته قابل ملاحظه دیگر آن است که تغییرات آنتالپی همیشه متناسب با اکسرژی نخواهد بود [12].

تعریف میزان اکسرژی کل در یک سیستم بسته به صورت زیر است [13]:

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{V^2}{2} + mgz \quad (1)$$

این معادله به ازای واحد جرم به صورت زیر خواهد بود:

$$\Psi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (2)$$

موازنه اکسرژی در یک سیستم باز به صورت زیر است [13]:

$$X_{heat} - X_{work} + X_{mass} - X_{destroyed} = \Delta X \quad (3)$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - [W - P_0(V_2 - V_1)] + \sum_{in} m \Psi - \sum_{out} m \Psi - X_{destroyed} = X_2 - X_1 \quad (4)$$

تغییرات اکسرژی به ازای واحد زمان نیز نوشته می‌شود:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left[\dot{W} - P_0 \frac{dV}{dt} \right] + \sum_{in} \dot{m} \Psi - \sum_{out} \dot{m} \Psi - \dot{X}_{destroyed} = \frac{dX}{dt} \quad (5)$$

اگر سیستم در حالت پایدار باشد پارامترهای متغیر با زمان حذف می‌شوند. در فرآیندهای برگشت‌پذیر به دلیل اینکه هیچ‌گونه برگشت‌ناپذیری در سیستم وجود ندارد، بنابراین میزان اتلاف اکسرژی صفر خواهد بود و در این سیستم‌ها می‌توان کار برگشت‌پذیر را مورد محاسبه قرار داد.

راندمان یک فرآیند بر مبنای مفهوم اکسرژی



ارزیابی یک فرآیند از طریق محاسبه میزان بازده سیستم بر مبنای اکسرژی می‌تواند به بهترین شکل صورت گیرد. تعریف بازده به سه شکل امکان‌پذیر است. در یک فرایند برگشت‌ناپذیر این پارامتر که به بازده اکسرژی یا قانون دوم معروف است به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود. این رابطه نسبت میزان توان تبدیل الکتریکی به میزان مصرف اکسرژی را به عنوان بازده در نظر می‌گیرد.

$$\eta_{exergy} = \frac{\dot{W}_e}{exergy\ consumption} \quad (6)$$

تعریف دیگر از بازده می‌تواند بر مبنای درجه برگشت‌پذیری فرایند بیان شود و به صورت نسبت اکسرژی کل محصولات به مجموع اکسرژی ورودی باشد (معادله 7). در برخی واکنش‌های شیمیایی بازده اکسرژی به صورت نسبت میزان اکسرژی ماده مطلوب تولیدی به کل میزان اکسرژی ورودی تعریف می‌شود.

$$\eta_{exergy} = \frac{exergy\ of\ "products"}{\sum(exergy\ inputs)} \quad (7)$$

نمونه‌هایی از کاربردهای صنعتی تحلیل اکسرژی

افزایش بازده انرژی در صنایع همواره به عنوان یکی از اهداف علمی مهم مورد توجه مدیران، مهندسان و محققان بوده است. اما این مسئله امروزه به عنوان یکی از اولویت‌های اساسی مطرح در دنیای تکنولوژی است. در اینجا به منظور بررسی دامنه اهمیت و کاربرد این مفهوم در فرآیندهای مختلف مهندسی، مروری بر برخی سیستم‌های موجود که تاکنون مورد توجه قرار گرفته‌اند، خواهیم داشت.

ورطه پرور و همکاران [14] در سال 1394 به منظور کاهش مصرف انرژی، یک روش خشک‌کن از ترکیب دو نوع خشک‌کن بستر سیال و بستر ثابت طراحی نمودند. در این پژوهش، مطابق قانون دوم ترمودینامیک به تحلیل اکسرژی و پارامترهای مؤثر بر تلفات و بازدهی اکسرژی این خشک‌کن ترکیبی پرداخته شده است. در آزمایش‌ها اثر سه دمای هوای ورودی 50، 60، 70 درجه سلسیوس به خشک‌کن و سه ضخامت بستر 4، 6، 8 سانتی متر در طبقه پایین که بستر سیال است و دو ضخامت 6، 8 سانتی متر در طبقه بالایی که بستر ثابت است، بررسی شده است. نتیجه‌ها نشان داد تلفات اکسرژی طبقه بالایی کم‌تر و بازدهی اکسرژی آن بیش‌تر از طبقه پایین می‌باشد. همچنین افزایش ضخامت طبقه پایین سبب افزایش تلفات و کاهش بازدهی اکسرژی طبقه بالا می‌شود در حالی که افزایش ضخامت طبقه بالایی موجب کاهش تلفات و افزایش بازدهی طبقه پایین می‌شود.

تحلیل اکسرژی و بهینه‌سازی برای یک دیگ بخار بازیافت حرارت لوله آبی توسط بهبهانی‌نیا و همکاران [15] انجام شده است. به منظور بهینه‌سازی، یک تابع هدف ترمودینامیکی که نشان‌دهنده اتلافات اکسرژی در دیگ است، تعریف شده است. اتلافات اکسرژی شامل اکسرژی تلف شده که ناشی از خروج گازهای گرم از دودکش و در نتیجه تلفات حرارتی دودکش است و اکسرژی نابود شده که ناشی از

اختلاف دم ای گاز و بخار و نیز افت فشار گاز در داخل دیگ است، در این تحقیق، با تغییر دمای پینچ، مقادیر متناظر تابع هدف محاسبه شده و به صورت یک نمودار ترسیم شده است. دمای پینچی که به ازای آن، تابع هدف کمینه باشد، دمای پینچ بهینه دیگ نامیده می شود. ارزش حرارتی بالای میعانات گازی موجب توجه شرکت های گازی به این منبع گران بها شده است. از این رو، شناخت ویژگی ها و شرایط نگهداری میعانات گازی اهمیت روزافزونی پیدا کرده است. طاهونی و همکارش [16] موفق به تحلیل اکسرژی واحد پایدار سازی میعانات گازی پالایشگاه پارس جنوبی واحد (103) شدند. بدین منظور، ابتدا شبیه سازی واحد به کمک نرم افزار شبیه سازی HYSYS انجام گرفته است. در ادامه، تحلیل اکسرژی بر روی تمام واحدهای فرایندی موجود به دو روش جریانی و واحدی انجام شده است. نتایج نشان داد که برج پایدارسازی فرایند و نیز مبدل حرارتی جانبی برج از مهمترین واحدهای فرایندی نیازمند اصلاح می باشند. روش جریانی بر اساس موازنه اکسرژی بین جریان های ورودی و خروجی به یک واحد فرایندی استوار است. که در قسمت مفهوم ریاضی اکسرژی به طور کامل شرح داده شد. روش واحدی نیز بر مبنای جریانات منابع سرد و گرم محاسبه می شود.

بوزوگلان¹ و هپباسلی² [17] به بررسی بازده اکسرژی واحد تصفیه روغن زیتون پرداخته و میزان اتلاف اکسرژی را در هر یک از وسایل موجود در واحد بررسی کردند. راندمان اکسرژی کاربردی برای واحد 12% محاسبه شده است در حالی که بازده اکسرژی بر مبنای محصول سوختی حدود 65% است. میزان حداکثر سرعت تخریب اکسرژی در بویلر و به ترتیب در واحد تقطیر و ژنراتور بخار دیده می شود. برای افزایش بازده اکسرژی واحد، به کارگیری اسمز معکوس و کنترل اسیدیته سیستم برای جلوگیری از خوردگی در بویلر و به کارگیری پمپ هایی با بازده بالا پیشنهاد شده است.

انسیناس³ و همکاران [18] در سال 2009 تجزیه و تحلیل تعادل اکسرژی در شکر، اتانول و برق را با توجه به وضعیت فعلی کارخانه نیشکر در برزیل انجام داده اند. فرآیند روش تولید به هشت واحد زیر تقسیم شد. استخراج آب، تصفیه آب، تبخیر آب، جوشش شکر، تخمیر، تقطیر، سیستم تولید هم زمان، مخزن میعانات و سیستم خنک کننده آب است. مشخص شد که، سیستم تولید هم زمان مسئول 63 درصد از کل تولید برگشت ناپذیر با راندمان اکسرژی 18% است. بهره وری اکسرژی محاسبه شده برای کل گیاه، که نشان دهنده قند و اتانول گیاهی معمولی در برزیل است، 35 درصد بود. با استفاده از دیگ بخار با راندمان حرارتی بالاتر همراه با کاهش نیاز به بخار در فرآیند برای افزایش بهره وری اکسرژی پیشنهاد شده است. خالیک⁴ و کوشیک⁵ [19] که بازده قانون دوم نیروگاه حرارتی را با تغییر تعداد فرآیندهای حرارتی و نسبت تراکم در توربین گازی محاسبه کردند. بازده طبق قانون اول توربین آدیاباتیک با افزایش نسبت بخار تغییر می کند. بازده طبق قانون دوم با افزایش نسبت فشار کاهش می یابد اما با افزایش میزان درجه حرارت میزان کار

¹ Bozoglan

² Hepbasli

³ Ensinas

⁴ Khaliq

⁵ Kaushik



اتلافی بیش‌تری امکان بازیافت را دارد. اتلاف اکسرژی در توربین بازگرمایش با میزان نسبت فشار افزایش می‌یابد. تعداد مراحل گرمایش مجدد و افت فشار در هر کدام از بازده‌های قانون اول و دوم از سیکل‌های ترکیبی با افزایش نسبت فشار تا حداکثر میزان 32 افزایش می‌یابند. و سپس با افزایش بیش‌تر در میزان نسبت فشار شروع به کاهش می‌کنند. اما میزان بازده قانون دوم نسبت به قانون اول برای سیکل‌های ترکیبی با میزان نسبت فشار یکسان بیش‌تر است.

کانوگلو¹ و دینسر² [20] بازده انرژی و اکسرژی سیستم‌های مختلف تولید هم‌زمان را بررسی نمودند. واحدهایی که مورد بررسی قرار گرفتند شامل سیستم توربین-بخار، سیستم توربین-گاز، سیستم موتور-دیزل و سیستم زمین گرمایی بودند. نتایج بررسی‌های انجام شده در جدول (3) آورده شده‌اند.

جدول 3. نتایج بررسی‌های انرژی و اکسرژی برای چهار سیستم مختلف تولید هم‌زمان

پارامترها	تولید هم‌زمان بخار	تولید هم‌زمان توربین-گاز	تولید هم‌زمان موتور-دیزل	تولید هم‌زمان زمین گرمایی
دمای ورودی سیال گرم به هیتر (°C)	249	303	400	100
دمای خروجی سیال گرم از هیتر (°C)	212	211	111	8
دمای ورودی آب به هیتر (°C)	50	50	50	50
دمای خروجی آب از هیتر (°C)	90	90	90	90
توان خالص خروجی (kW)	10000	10000	20000	10000
میزان حرارت به‌کار رفته (kW)	13500	13500	13500	13500
اکسرژی ورودی به واحد (kW)	50960	52000	45620	26650
میزان اتلاف اکسرژی در واحد (kW)	39200	40240	23860	14885
بازده انرژی (%)	47/8	46/8	78/2	16/1
بازده اکسرژی (%)	23/1	22/6	47/7	44/1

محمد نژاد و همکاران [21] فرآیند تولید اتانول زیستی را از مواد لیگنوسلولزی مورد بررسی اکسرژی قرار دارند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان بازده اکسرژی به ترتیب برابر 79/58% و 73/98% است.

اکبولوت³ و دورموس⁴ [22] فرآیند خشک کردن شاه توت را به کمک روش لایه نازک در یک خشک‌کن خورشیدی اجباری مورد بررسی قرار دادند. تحلیل انرژی و اکسرژی سیستم به‌وسیله نوشتن قوانین اول و دوم ترمودینامیک به ترتیب انجام گرفته است. با پنج سرعت جریان خشک کردن متفاوت در محدوده

¹ Kanoglu

² Dincer

³ Akbulut

⁴ Durmus

0/014 تا 0/036 کیلوگرم بر ثانیه، میزان بازده انرژی به ترتیب 55/2 %، 32/19 %، 29/2 %، 21/5 % و 20/5 % به دست آمده‌اند. در این محدوده تغییرات سرعت جرمی جریان خشک کردن، میزان اتلاف اکسرژی برابر 10/82، 6/41، 4/92، 4/06، 2/65 وات گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان بازده انرژی و میزان اتلاف اکسرژی با افزایش میزان سرعت جرمی خشک کردن کاهش می‌یابند در حالی بازده اکسرژی افزایش می‌یابد.

بوکادوم¹ و بنزویی² [23] خشک کن خورشیدی از نوع غیرمستقیم را که به منظور خشک کردن نعنا تحت شرایط آب و هوایی الجزایر مورد استفاده قرار می‌گیرد، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از تحلیل اکسرژی به منظور بررسی میزان اتلاف انرژی در طی فرآیند استفاده کردند. اتلاف اکسرژی در محدوده 0 تا 0/125 کیلوژول به ازای هر کیلوگرم محصول در طی روز اول و بین 0 تا 0/09 کیلوژول به ازای هر کیلوگرم محصول در طی روز دوم تغییر می‌کند. بیشترین میزان اتلافات اکسرژی در طول روز دوم فرآیند خشک کردن نعنا قابل دستیابی است.

جدول (4) خلاصه‌ای از دیگر تحقیقات صورت گرفته در زمینه تحلیل فرآیندهای شیمیایی توسط مفهوم اکسرژی را ارائه می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

عوامل موثر بر افزایش بازدهی اکسرژی سیستم به کمک بررسی روابط موجود و همچنین نتایج حاصل از مطالعات قبلی امکان پذیر است. در تمامی مطالعات صورت گرفته کاهش اتلاف انرژی درون سیستم پارامتر مهم و اقتصادی محسوب شده و در برخی موارد اولویت طراحی قرار گرفته است. با شناخت عوامل موثر بر روی بازدهی اکسرژی می‌توان مقادیر بهینه را برای هر یک از پارامترها مشخص و به بازدهی مطلوب دست یافت. برای تجزیه و تحلیل اکسرژی، حالت محیط مبنا و یا حالت مبنا، باید به طور کامل مشخص شود. حالت مبنا با داشتن مشخصات دما، فشار و ترکیب شیمیایی قابل مشخص شدن است. بدین ترتیب نتایج حاصل از انرژی و اکسرژی بر مبنای یک حالت مبنا حاصل می‌شوند. به طور کلی، با تجزیه و تحلیل اکسرژی به جای تجزیه و تحلیل انرژی راندمان معنی‌دارتری حاصل می‌شود. بنابراین تحلیل اکسرژی قادر است تا به کمک کاهش ناکارآمدی‌های سیستم موجب بالا رفتن بازده انرژی در آن شود.

به کارگیری هر گونه سیستم ذخیره و یا بازیابی انرژی در فرآیندهای مختلف موجب بالا رفتن بازدهی اکسرژی خواهد شد. در اکثر فرآیندهای صنعتی میزان بازدهی تولید با میزان بازدهی اکسرژی رابطه مستقیم داشته و در صورت کم شدن بازدهی اکسرژی میزان بازدهی تولید نیز کاهش می‌یابد. در مورد سیستم‌های برگشت‌ناپذیر، بازده اکسرژی همان بازده واقعی است. در چنین فرآیندهایی بازده انرژی کل بر خلاف میزان بازدهی اکسرژی کل پایین، بالا است. انرژی در خشک کردن مواد کشاورزی و صنعتی بسیار موثر است و بنابراین به عنوان یک عامل بسیار مهم در کاهش هزینه فرآیند محسوب می‌شود.

¹ Boukadoum

² Benzaoui

بازدهی سیستم همان گونه که از مطالعات قبلی صورت گرفته مشخص می شود، به صورت مختلف و بر مبنای معیارهای گوناگون که توسط محقق مورد نظر هستند تعریف می شود. در خیلی از این تعاریف می توان با وارد نمودن پارامترهای مهم سیستم مورد بررسی، بهینه سازی بازدهی اکسرژی را بر مبنای مقدار پارامتر کلیدی مدنظر انجام داد. بازده برخی اجزا واحد بوسیله افزایش اندازه آن ها بهبود می یابد. به عنوان مثال عملکرد مبدل های حرارتی یک واحد طراحی شده با افزایش سطوح انتقال حرارت بهبود می یابد. البته این افزایش اندازه به دلیل محدودیت های اقتصادی ترجیح داده نمی شود. بنابراین آنچه به عنوان راندمان یک فرآیند بر مبنای مفهوم اکسرژی در این مقاله ارائه شده است، صرفاً یک تعریف فراگیر بر مبنای مفاهیم کلی موجود می باشد. تعریف راندمان اکسرژی در سیستم های مختلف می تواند بر مبنای مفاهیم و کمیت های مهم مربوط به همان سیستم باشد.

جدول 4. خلاصه تحقیقات صورت گرفته در زمینه تحلیل فرآیندهای شیمیایی توسط مفهوم اکسرژی

نوع سیستم	نام محققین و شماره مرجع	روش کار	اهم نتایج حاصله
سنتز آمونیاک	کریتز ¹ و همکاران [24]	در این تحقیق هدف مقایسه میان حداکثر میزان انرژی و اکسرژی خروجی از یک واحد عملیاتی است. مفهوم اکسرژی در مورد سیستم بیان شده و برخی روابط ترمودینامیکی مورد تحلیل قرار گرفته اند. در این تحقیق شرایط مختلف بهینه در یک راکتور عملیاتی و روند بهینه سازی بر مبنای حداکثر میزان اکسرژی خروجی از سیستم صورت گرفته است.	روش مورد بررسی در این تحقیق می تواند روشی کاربردی در تحلیل انرژی سیستم باشد. تحلیل اکسرژی در این سیستم ها انجام شده و با مطالعات قبلی مورد مقایسه قرار گرفته است. تغییرات سرعت جریان، فشار، دمای گاز ورودی و دمای دیواره راکتور تخمین زده شده است. بهینه سازی مقادیر کمیت های مربوطه به همراه حداکثر توان و اکسرژی خالص خروجی به کمک تحلیل اکسرژی صورت گرفته است.
	زرینتزا ² و همکاران [25]	در این مطالعه تحلیل اکسرژی به منظور تخمین اثر پارامترهای مهم فرآیند بر روی بازدهی اکسرژی سنتز صنعتی آمونیاک صورت گرفته است. به کمک این تحلیل می توان پتانسیل لازم به منظور بهبود طراحی سنتز آمونیاک را بررسی نمود.	میزان بازدهی اکسرژی زمانی که سیستم به تعادل می رسد کاهش می یابد زیرا با کاهش میزان اکسرژی همراه است. دو نوع طراحی مختلف از سیستم سنتز آمونیاک مورد تحلیل قرار گرفته است. میزان اتلاف اکسرژی با وجود تفاوت بین این دو نوع جریان سنتز آمونیاک، یکسان گزارش شده است.
تقطیر	ریورو ³ و همکاران [26]	شناسایی و بررسی نکات کلیدی در مورد یک سیستم تقطیر از دیدگاه اکسرژی و همچنین بهینه سازی هزینه تولید در این تحقیق انجام شده است. نتایج تحلیل اکسرژی و بررسی اقتصاد فرآیند بر مبنای آن در این مقاله ارائه گردیده است.	واحدهای تقطیر در خلا و اتمسفریک بیشترین میزان اتلاف اکسرژی را در صنعت دارند. بنابراین تلاش برای بهینه سازی این اتلاف هدف قرار گرفته است. بیشترین هزینه در طول فرآیند مربوط به این واحدهای جداسازی است که به دلیل حداکثر اتلاف انرژی در آن ها رخ می دهد.
تقطیر	ریورو و همکاران [27]	بهینه سازی و شبیه سازی اکسرژی واحد تقطیر دو جزئی انجام شده است. محاسبه اکسرژی تخریبی درون ستون جداسازی (مخلوط اتانول	اتلاف اکسرژی در این برج به صورت تفاوت اکسرژی کل ورودی به سیستم و اکسرژی کل خروجی از سیستم محاسبه می شود. میزان

¹ Kreetz

² Yordanova

³ Rivero

<p>اتلاف اکسرژی در هر سینی به دلیل وجود تفاوت در مقادیر دما و ترکیب درصد جریانات مایع و بخار ایجاد می‌شود. میزان اتلاف اکسرژی به شدت وابسته به تعداد سینی-هاست. از این رو به شیب منحنی تعادل که در تئوری تعیین تعداد سینی‌ها نقش دارد نیز وابسته خواهد بود.</p>	<p>و آب) و بهینه‌سازی اتلاف انرژی حرارتی درون برج به منظور ایجاد حداقل اتلاف اکسرژی در این مقاله ارائه گردیده است.</p>		
<p>بیش‌ترین میزان اتلاف اکسرژی بر روی نمودار مقدار 77.7% بوده که در واحد MSF رخ می‌دهد. کاهش میزان اتلاف به کمک افزایش تعداد مراحل فرآیند فلش امکان‌پذیر است. برای کاهش میزان اتلاف اکسرژی درون پمپ‌ها می‌توان از پمپ با بازدهی بالا عملیاتی استفاده نمود. بازدهی قانون دوم این واحد تنها 4/2% است. بازدهی قانون دوم به صورت نسبت حداقل اکسرژی ورودی مورد نیاز به کل اکسرژی ورودی حقیقی تعریف شده است. 20% از میزان اکسرژی کل در پمپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.</p>	<p>یک واحد بزرگ تقطیر به کمک داده‌های حقیقی یک واحد عملیاتی مورد تحلیل ترمودینامیکی قرار گرفته است. سرعت جریان اکسرژی در نقاط مختلف سیستم مورد بررسی و بر روی نمودار ارائه شده است. همچنین میزان اتلاف اکسرژی محاسبه و درصد آن بر روی نمودارها مشخص شده است.</p>	<p>کهرمان¹ و همکاران [28]</p>	
<p>با بالا رفتن مقدار دمای فرآیند میزان اتلاف اکسرژی بالا می‌رود. بالا رفتن دما موجب بالا رفتن بازدهی تجزیه می‌شود. دو نوع احتراق به صورت مستقیم و غیرمستقیم مورد بررسی قرار گرفته که میزان اتلاف اکسرژی در فرآیند احتراق مستقیم بیش‌تر از نوع غیرمستقیم است. میزان بازدهی اکسرژی در فرآیند مستقیم بیش‌تر خواهد بود.</p>	<p>بررسی اکسرژی فرآیند احتراق متانول یک جنبه مهم ترمودینامیکی در بررسی اقتصاد انرژی کل فرآیند است. ترکیب تحلیل اکسرژی و انرژی به منظور شناسایی برگشت-ناپذیری‌های فرآیند در این مطالعه صورت گرفته است.</p>	<p>نووان² و همکاران [29]</p>	
<p>احتراق جریان هوا با دمای بالا نسبت به هوایی با دمای محیط میزان بازدهی اکسرژی بهتری را در بردارد. زمانی که یک سوخت می‌سوزد میزان اکسرژی کاهش می‌یابد. میزان این پارامتر در این مقاله توسط دمای محیط و دمای احتراق محاسبه شده است. زمانی که میزان دمای هوای پیش گرم شده بالا می‌رود میزان تغییر اکسرژی نیز زیاد می‌شود. میزان اکسرژی جریان با توجه به رابطه ارائه شده توسط افت فشار یا دما کاهش می‌یابد.</p>	<p>در این تحقیق مفهوم اکسرژی در فرآیند سوختن بر مبنای سطح دمای تعیین شده مورد تحلیل قرار گرفته است.</p>	<p>تانیگوچی³ و همکاران [30]</p>	<p>احتراق</p>

¹ Kahraman

² Nuwan

³ Taniguchi

<p>شبکه مبدل- های حرارتی</p>	<p>جین¹ و همکاران [31]</p>	<p>به کمک تحلیل اقتصادی بحث اکسرژی میزان بهینه برای فاکتور رسوبگیری در مبدل‌های حرارتی محاسبه شده است. روش مورد استفاده در این بررسی در مورد یک واحد صنعتی به کار رفته است.</p>	<p>میزان فاکتور جرم‌گرفتگی به میزان 80% از مقدار معمول خود در نظر گرفته شده است. میزان سطح انتقال حرارت در این شرایط به میزان 350 متر مربع نسبت به سطح اولیه خود کاهش دارد. بررسی اتلاف اکسرژی با تغییرات دمای فرایند به صورت پیوسته صورت گرفته است. و از اختلاف دمای متوسط برای محاسبه مصرف اکسرژی استفاده نشده است. در این مقاله میزان مصرف اکسرژی معادل با میزان انتگرال نمودار دما بر حسب آنتالپی در نظر گرفته شده است. میزان سطح انتقال حرارت هرچقدر کاهش یابد میزان فاکتور رسوب درصد بالاتری از مقدار اولیه خواهد بود. به عبارت دیگر هر چه مقدار مصرف اکسرژی کاهش یابد میزان فاکتور رسوب درصد کم‌تری از مقدار اولیه را خواهد داشت.</p>
<p>شبکه مبدل- های حرارتی</p>	<p>ینگ وو² و همکاران [32]</p>	<p>در این مقاله به بررسی اثر انتقال اکسرژی بر عملکرد مبدل‌های حرارتی که در دمای بالاتر و یا کم‌تر از محیط (افت فشار محدود) عمل می‌کنند، پرداخته شده است. نتایج پارامتر انتقال اکسرژی در یک سیستم با افت فشار محدود و در سیستم بدون افت فشار، زمانی که دو سیال حامل متفاوت یکی گاز ایده‌آل و دیگری مایع غیرقابل تراکم باشند مقایسه شده است. پارامتر انتقال اکسرژی به صورت نسبت سرعت انتقال اکسرژی حقیقی به حداکثر میزان اکسرژی ممکن می‌باشد. ویژگی‌های سیال و بررسی عملکرد مبدل‌ها در حالت پایدار انجام شده است.</p>	<p>زمانی که میزان دمای ورودی سیال سرد و گرم ثابت باشد، میزان حداکثر اکسرژی خروجی نیز ثابت خواهد بود. با زیاد شدن NTU مقدار کارایی افزایش کمی دارد این در حالی است که میزان R (نسبت ظرفیت گرمایی سیال سرد به سیال گرم) اگر افزایش یابد مقدار کارایی با کاهش شدید مواجه می‌شود. در هر سه نوع جریان موازی، متقاطع و معکوس مقدار بازدهی سیستم، مورد ارزیابی قرار گرفته است که مقدار آن در جریان معکوس از همه بیشتر و در موازی از همه کم‌تر خواهد بود. میزان افت فشار را در مبدلی که در دمایی بالاتر از دمای محیط کار می‌کند، در صورتی که R خیلی زیاد باشد نمی‌توان ناچیز فرض کرد. این در حالی است که در مورد مبدلی که در دمایی پایین‌تر از محیط کار می‌کند میزان افت فشار قابل صرف‌نظر است.</p>
<p>تولید گاز به کمک توده زیستی</p>	<p>تونسن³ و همکاران [33]</p>	<p>تحلیل اکسرژی واحدهای تولید هیدروژن موجود به کمک توده زیستی را انجام داده‌اند. در این مطالعه دو واحد تولید هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته است. یکی واحد با دمای گاز پایین (LTGC) و دیگری با دمای بالا (HTGC) می‌باشد.</p>	<p>به کارگیری سیستم بازیابی انرژی در سیستم موجب بالا رفتن بازدهی اکسرژی شده است. میزان بازدهی فرایند با دمای پایین گاز بیش‌ترین مقدار را خواهد داشت. فرآیندهای مربوطه بر مبنای انرژی کل ورودی زیست توده برابر با 10 MJ انجام می‌شوند. فرایند تولید هیدروژن تحت دمای گاز بالا در صورتی که اتلاف درون سیستم کم باشد، ارجحیت دارد. در صورتی که بازدهی تولید هیدروژن کم شود میزان بازدهی اکسرژی نیز کاهش می‌یابد.</p>

¹ Jin

² Ying Wu

³ Toonsen

<p>در محدوده دمایی 900-1373 افزایش در میزان رطوبت توده زیستی منجر به کاهش بازدهی انرژی و اکسرژی فرآیند مورد بررسی می‌گردد. میزان محتوای رطوبت توده زیستی بهینه شده است. مقادیر به دست آمده از میزان بازدهی سیستم با نتایج آزمایشگاهی و همچنین نتایج حاصل از کارهای گذشته تطابق خوبی دارد. فرآیندهای آدیاباتیک و هم‌دم نسبت به تغییر رطوبت و فشار روند یکسانی دارند. میزان اکسرژی فیزیکی وابستگی کمتری نسبت به تغییرات محتوای رطوبت زیست توده دارد. بازدهی اکسرژی بر اثر رفتن دما و رطوبت توده زیستی کاهش می‌یابد.</p>	<p>تحلیل انرژی و اکسرژی واحد تولید گاز به کمک توده زیستی، در دماهای مختلف انجام گرفته است. این تحقیق تولید گاز به کمک توده زیستی با رطوبت‌های مختلف، تحت دماهای گوناگون را نشان می‌دهد. این مقاله به بررسی میزان حرارت مازاد مورد نیاز به همراه جریانات ورودی در شرایط بهینه، با میزان رطوبت‌های مختلف توده زیستی نیز می‌پردازد. میزان بازدهی اکسرژی به صورت نسبت میزان کل اکسرژی گاز ورودی به اکسرژی توده زیستی تعریف شده است.</p>	<p>کارامرکویک¹ و همکاران [34]</p>	
<p>تغییرات دما و آنتالپی جریان‌های گاز و مایع در طول برج بر مبنای حل معادلات انرژی، جرم و ممنتوم به طور هم‌زمان گزارش شده است. همچنین به کمک به‌کارگیری مفهوم اکسرژی و انرژی، بازدهی هر یک از این مفاهیم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که میزان بازدهی اکسرژی در مقایسه با مقدار بازدهی انرژی بسیار کم‌تر خواهد بود. این میزان کم بازدهی اکسرژی به دلیل وجود برگشت‌ناپذیری و تولید آنتروپی در سیستم می‌باشد. اثر پارامترهای مختلف عملیاتی از قبیل قطر و ارتفاع برج، توزیع اندازه قطرات مایع و شدت جریان مایع بررسی شده است.</p>	<p>در این مطالعه یک مدل ریاضی به منظور بررسی انرژی و اکسرژی در یک برج پاششی سرمایه‌گذاری گاز همسو ارائه شده است.</p>	<p>نیک سیر و رحیمی [8]</p>	<p>برج‌های پاششی سرمایه‌گذاری گاز</p>

علائم و اختصارات

a	Accessibility
T_0 (K)	Base Temperature
U (J)	Chemical Potential
u (J/Kg)	Chemical Potential Per Unit Mass
x (%)	Composition

¹ Karamarkovic



$\eta(\%)$	Efficiency
$I (A)$	Electrical Current
$\Delta v (V)$	Electrical Voltage Difference
$H (J)$	Enthalpy
$h(J)$	Enthalpy
$S (J)$	Entropy
$X (J)$	Exergy
$E (J)$	Exergy
$G(m^3/s)$	Flow Rate
$G^0 (J)$	Gibbs Energy
$g (m/s^2)$	Gravitational Acceleration
$Q (J)$	Heat Transfer
$\dot{Q}_k (J/s)$	Heat Transfer Rate
$z (m)$	Height
$m(Kg)$	Mass
$F (Kg/s)$	Mass Flow Rate
$n (-)$	Mixture Component Number
$\dot{W} (J/s)$	Power

P_0 (Pa)	Pressure
s (J/Kg)	Specific Entropy
Ψ (J/Kg)	Specific Exergy
σ (W/M ² K ⁴)	Stefan Boltzmann Constant
v (-)	Stoichiometry
T (K)	Temperature
t (s)	Time
V (m/s)	Velocity
W (J)	Work
w (J/Kg)	Work Per Unit Mass

مراجع

- [1] Baehr, H. D., Schmidt, E. F., Definition and Calculation of the Exergy of Fuels, BWK, Vol.15, 1963, pp 375-381.
- [2] Rant, Z., Exergy, a new name for technical availability, Forschung Ingenieurwissenschaftlichen Wesen Vol. 23, 1956, pp 38–39.
- [3] Sciubba, E., Beyond thermoeconomics The concept of Extended Exergy Accounting and its application to the analysis and design of thermal systems, Exergy Int. J, Vol.1, 2001.
- [4] Syahrul, S., Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. Exergy, an International Journal, Vol.2, 2002, pp. 87-98.
- [5] Liora, Noam., Zhangb, N., Energy, exergy, and Second Law performance criteria, Energy. Vol.32, 2007, pp 281–296.
- [6] Wall, Goran., Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society, Energy Conversion and Management, Vol.43, 2002, pp 1235–1248.
- [7] Koroneos, Ch., Spachos, T., Moussiopoulos, Nikolaos., Exergy analysis of renewable energy sources, Renewable Energy, Vol.28, 2003, pp 295–310.
- [8] Arezou Niksiar, Amir Rahimi, Energy and exergy analysis for cocurrent gas spray cooling systems based on the results of mathematical modeling and simulation, Energy, Vol.34, 2009, pp 14–21.



- [9] José, A., David, J., Systems Engineering in Terms of Exergy, Moorhousinternational Journal of Aerospace Engineering, 2009, 7 pages.
- [10] Ivar, S., Ertesvåg, Hanne M., Kvamsdal, Olav, Bolland., Exergy analysis of a gas-turbine combined-cycle power plant with precombustion CO2 capture, Energy, Vol.30, 2005, pp 5-39.
- [11] Ojeda, K., Kafarov, V., Exergy analysis of enzymatic hydrolysis reactors for transformation of lignocellulosic biomass to bioethanol, Chemical Engineering Journal. Vol.154, 2009, 390-395.
- [12] Rivero, R., Application of the exergy concept in the petroleum refining and petrochemical industry, Energy Conversion and Management, Vol.43, 2002, pp 1199-1220.
- [13] Dewulf, J. Van Langenhove, H. Muys, B. Bruers, S. Bakshi BR, Grubb GF, Paulus, DM, Sciubba E., Exergy: its potential and limitations in environmental science and technology, Environ Sci Technol, Vol.42(7), 20081, pp 2221-32.
- [14] ورطه‌پور، و.، کیانمهر، م.ح.، عرب حسینی، ا.، حسن بیگی، س.ر.، تحلیل اکسرژی خشک کن ترکیبی بستر سیال - ثابت، شیمی و مهندسی شیمی ایران، 32، 1392، صفحه 55-47.
- [15] بهبهانی نیا، ع.، صیادی، س.، تحلیل اکسرژی و بهینه‌سازی دمای پینچ در دیگ‌های بخار بازیافت حرارت، پانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، 1386.
- [16] طاهونی، ن.، جعفری اشلقی، م.ر.، تحلیل اکسرژی واحد پایدارسازی میعانات گازی پالایشگاه پارس جنوبی، نشریه انرژی ایران، 2، 1392.
- [17] Bozoglan, E., Hepbasli, A. Performance improvements for olive oil refining plants. International Journal of Energy Research, Vol. 34 (6), 2010, pp 476-493.
- [18] Ensinas, A., Modesto, M., Nebra, S., & Serra, L. Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugarcane. Energy, Vol.34 (5), 2009, pp 680-688.
- [19] Khaliq, A., Kaushik. SC. Second-law based thermodynamic analysis of Brayton/Rankine combined power cycle with reheat. Applied Energy, Vol. 179, 2004, pp 78-97.
- [20] Kanoglu, M., Dincer, I. Performance assessment of cogeneration plants. Energy Conversion and Management, Vol. 50, 2009, pp 76-81.
- [21] Mohammadnejad, M., Ghazvini, M., Javadi, FS., Saidur, R. Estimating the exergy efficiency of engine using nanolubricants. Energy Education Science and Technology A: Energy Science and Research, Vol. 27(2), 2011, pp 447-54.
- [22] Akbulut, A., Durmus, A. Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. Energy, Vol. 35, 2010, pp 1754-63.
- [23] Boulemtafes-Boukadoum, A., Benzaoui, A. Energy and exergy analysis of solar drying process of Mint. Energy Procedia, Vol. 6, 2011, pp 583-91.
- [24] Kreetz, H., Lovegrove, K. Exergy analysis of an ammonia synthesis reactor in a solar thermo chemical power system, Solar Energy. Vol. 73(3), (2002), 187-194.
- [25] Yordanova, Z. K., Exergy analysis of industrial ammonia synthesis, Energy,

- Vol.29, 2004, pp 2373–2384.
- [26] Rivero, R., Rendo, C., Gallegos, S., Exergy and exergoeconomic analysis of a crude oil combined distillation unit, *Energy*, Vol. 29, 2004, pp 1909–1927.
- [27] Rivero, R., Exergy simulation and optimization of adiabatic and diabatic binary distillation, *Energy*, Vol. 26, 2001, pp 561–593.
- [28] Kahraman, N., Yunus, A. C. Exergy analysis of a MSF distillation plant, *Energy Conversion and Management*. Vol. 46, 2005, pp 2625–2636.
- [29] Nuwan, H. P., Alwis, S. D., Mohamad, A. A., Mehrotra, A. K. Exergy Analysis of Direct and Indirect Combustion of Methanol by Utilizing Solar Energy or Waste Heat, *Energy & Fuels*. Vol.23, 2009, pp 1723–1733.
- [30] Taniguchi, H., Mouri K., Nakahara, T. Exergy analysis on combustion and energy conversion processes, *Norio Arai Energy*, Vol.30, 2005, pp 111–117.
- [31] Jin, Z., Dong, Q., Liu, M. Exergy Study of Fouling Factors in Heat Exchanger Networks, *Journal of Heat Transfer*. Vol. 132, 2010.
- [32] Ying Wu, S., Yuan, X. F., Li, Y. R., Xiao, L. Exergy transfer effectiveness on heat exchanger for finite pressure drop, *Energy*. Vol.32, 2007, pp 2110–2120.
- [33] Toonssen, R., Woudstra, N., Verkooijen, A. H. M. Exergy analysis of hydrogen production plants based on biomass gasification, *International journal of hydrogen energy*. Vol.33, 2008, pp 4074–4082.
- [34] Karamarkovic, R., Karamarkovic, V. Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures, *Energy*. Vol.35, 2010, pp 537–549.