

اکسرژی

قانون اول ترمودینامیک، تغییر انرژی داخلی در یک چرخه $(\Delta U_{\text{cycle}})$ ، یعنی تفاوت بین گرمای چرخه (Q_{cycle}) و کار چرخه (W_{cycle}) ، صفر است:

(۱)

$$\Delta U_{\text{cycle}} = Q_{\text{cycle}} - W_{\text{cycle}} = 0 \Rightarrow W_{\text{cycle}} = Q_{\text{cycle}} = Q_H - Q_C$$

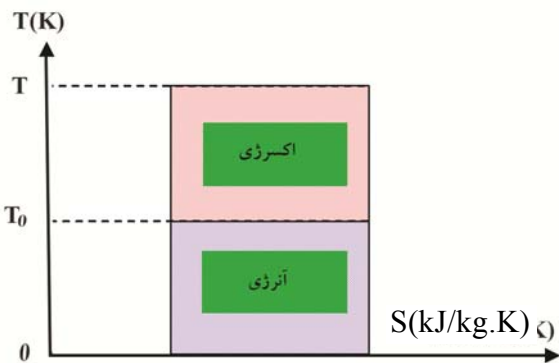
بدین ترتیب کار تولیدی در شکل ۱- ب برابر با رابطه ۲ خواهد بود:

$$0 \leq W_{\text{cycle}} \leq Q_H \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \quad (2)$$

در رابطه ۲ بالاترین میزان بازده گرمای مربوط به چرخه برگشت پذیر کارنو با دو فرآیند آدیاباتیک و دو فرآیند هم‌دما است؛ بنابراین اگر مقدار گرما Q در دمای T وجود داشته باشد، اکسرژی آن (E_x) یعنی بیشترین مقدار کار محوری (W_{max}) در ماشین برگشت پذیر و تا رسیدن به شرایط محیطی قابل محاسبه است (رابطه ۳). شرایط محیطی، به صورت منبع نامتناهی گرمایی با دمای ثابت $T_0 = 25^\circ\text{C}$ و فشار ثابت $P_0 = 1\text{atm}$ تعریف می‌شود.

$$E_x = W_{\text{max}} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (3)$$

به بیان دیگر، مطابق با شکل ۲ انرژی از یک بخش مفید (اکسرژی) و یک بخش غیرمفید (انرژی) تشکیل شده است. این تقسیم‌بندی ساده مربوط به حالتی است که تنها تغییرات دمایی در سامانه وجود داشته باشد و تغییرات فشاری و ترکیب درصد لحاظ نشود [۲].



شکل ۲. تجزیه انرژی گرمایی به دو بخش اکسرژی و انرژی [۲].

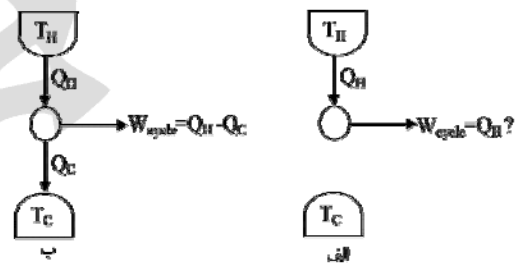
Exergy

بیشترین مقدار کار محوری که می‌توان در مجموعه‌ای از سامانه‌های ایدئال از مقدار انرژی اعمال شده دریافت کرد.

بنابر تعریف دیگری، بیشترین مقدار کار محوری که می‌توان از یک سامانه، از طریق رسیدن به تعادل ترمودینامیکی با محیط و با استفاده از فرآیندهای برگشت پذیر دریافت کرد، اکسرژی نامیده می‌شود. اصطلاح اکسرژی برای اولین بار به وسیله Rant در سال ۱۹۵۶ به کار رفته است و اشاره به لغات یونانی ex (خارجی) و ergos (کار) دارد [۱]. انگیزه اصلی تعریف کلمه اکسرژی، ایجاد واژه‌ای جهانی برای بیان مفهوم انرژی در دسترس (availability) بود.

مفهوم اکسرژی

برای درک مفهوم اکسرژی به مثال ساده تبدیل گرما به کار در شکل ۱- الف توجه کنید. بر طبق قانون دوم ترمودینامیک، گرما نمی‌تواند با بازده ۱۰۰ درصد به کار تبدیل شود (بیان Kelvin-Planck). به عبارت دیگر امکان دریافت کار خالص از یک چرخه ترمودینامیکی با تنها یک منبع گرمایی وجود ندارد [۲].



پژوهشگاه مواد و انرژی

شکل ۱. چرخه ترمودینامیکی الف) با یک منبع گرمایی ب) با دو منبع گرمایی.

از طرف دیگر، اگر فرآیند چرخه ترمودینامیکی بین دو منبع دمایی کار کند و گرما Q_H را از منبع با دمای T_H دریافت و گرما Q_C را به منبع با دمای $T_C < T_H$ منتقل کند، بین مقدار صفر تا حد بالایی مطابق با قانون دوم ترمودینامیک، کار تولید خواهد شد (شکل ۱- ب). بر طبق

اکسرژی و انرژی

برطبق قانون اول ترمودینامیک، مجموع کل حالات انرژی ورودی به یک سیستم (آنتالپی جریان، گرما و کار) با مجموع انرژی‌های خروجی از سیستم (آنتالپی جریان، گرما و کار) برابر هستند.

$$\left[\sum_{\text{ورودی}} (nh+Q+W_S) \right] - \left[\sum_{\text{خروجی}} (nh+Q+W_S) \right] = 0 \quad (۴)$$

در رابطه ۴ جملات مربوط به انتقال گرما، کار مثبت هستند اما آنتالپی ویژه، با توجه به حالت پایه تعریفی ممکن است مقداری مثبت یا منفی باشد؛ قانون دوم ترمودینامیک و یا موازنه آنتروپی نیز مطابق با رابطه ۵ فرمول‌بندی می‌شود. برخلاف موازنه انرژی در قانون اول ترمودینامیک که قانون بقای انرژی را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که انرژی از بین نمی‌رود و تنها از شکلی به شکل دیگر تبدیل می‌شود، موازنه آنتروپی، تولید آنتروپی را پیش‌بینی می‌کند. در این رابطه، آنتالپی ورودی و خروجی از سیستم، شامل بخش‌های آنتروپی جریان‌ها و آنتروپی ناشی از انتقال گرما است. تولید آنتروپی مجموع سیستم و محیط (ΔS_{irr}) همواره مقداری مثبت و معیاری برای اندازه‌گیری عددی ناکارآمدی ترمودینامیکی یک فرآیند (برگشت‌ناپذیری) است. وقتی یک فرآیند به حالت برگشت‌پذیر نزدیک شود، تولید آنتروپی آن نزدیک به صفر خواهد بود [۳].

$$\left[\sum_{\text{خروجی}} \left(ns + \frac{Q}{T_S} \right) \right] - \left[\sum_{\text{ورودی}} \left(ns + \frac{Q}{T_S} \right) \right] = \Delta S_{\text{irr}} \quad (۵)$$

ترکیب قوانین اول و دوم ترمودینامیک، موازنه اکسرژی را مطابق با رابطه ۶ بیان می‌کند [۳]. در این رابطه، اکسرژی ورودی و خروجی از سیستم شامل بخش‌های اکسرژی جریان‌ها، اکسرژی گرما و کار است.

$$\left[\sum_{\text{خروجی}} \left(nb + Q \left(1 - \frac{T_0}{T_S} \right) + W_S \right) \right] - \left[\sum_{\text{ورودی}} \left(nb + Q \left(1 - \frac{T_0}{T_S} \right) + W_S \right) \right] = T_0 \Delta S_{\text{irr}} \quad (۶)$$

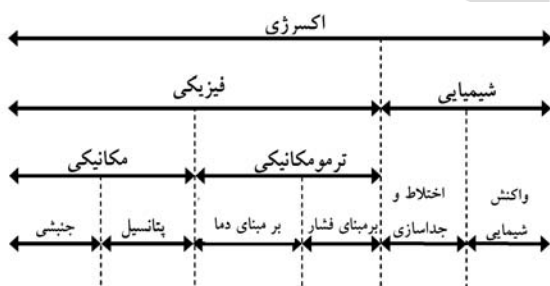
در یک سیستم باز، با شرایط ترمودینامیکی T_1 ، p_1 ، μ_1 ، V_1 ، Z_1 که تنها با محیط مرجع T_0 ، p_0 ، μ_0 ، V_0 ، Z_0 ، درهم کنش دارد و غلظت ماده ۱ در آن، مقدار c_0 است، اکسرژی ویژه b برحسب Jkg^{-1} با صرف نظر از انرژی الکتریکی از رابطه ۷ به دست می‌آید [۳]. در این رابطه، عبارت $(h-T_0s)$ ، انتقال اکسرژی فیزیکی جریان با فشار و دمایی معین (ترمودینامیکی) تا شرایط محیطی را نشان می‌دهد. اکسرژی فیزیکی مربوط به انرژی پتانسیل (gz) و انرژی جنبشی $\frac{1}{2}V^2$ با مقادیر انرژی آنها برابر است. عبارت $(\Delta g + RT_0 \ln(c/c_0))$ نیز اکسرژی شیمیایی ناشی از تغییر ترکیب مواد تا شرایط

جدول ۱. اکسرژی ویژه برای جریان‌های مختلف انرژی

واحد	اکسرژی ویژه	انرژی ویژه	نوع
J/kg	$\frac{1}{2}V^2$	$\frac{1}{2}V^2$	جنبشی
J/kg	$g\Delta z$	$g\Delta z$	پتانسیل
J/kg	$Q \left(1 - T_0/T_Q \right)$	Q	گرما
J/kg	w	w	مکانیکی
J/kg	$I.t (\Delta V)$	$I.t (\Delta V)$	الکتریکی
J/kg	$\mu - \mu_0 + RT_0 \ln(c/c_0)$	Δg	شیمیایی (ماده خالص)
W/m^2	$\sigma \left(T^4 - 4T^3T_0/3 + T_0^4/3 \right)$	I	تشعشع

اکسرژی

همانطور که در شکل ۳ مشخص است، اکسرژی ترمومکانیکی به دو بخش اصلی دمایی و فشاری تقسیم می شود. این تقسیم بندی مفهومی واقعی ندارد و تنها برای روشن کردن مطلب است. سیستمی را در نظر بگیرید که از شرایط ترمودینامیکی p و T به حالت تعادل با محیط در شرایط p_0 و T_0 می رسد. شکل ۴ دو مسیر منطقی حدی $a + b$ و $c + d$ را نشان می دهد. مطابق با شکل دما و فشار در مسیر e تغییر می کند. بخش دمایی اکسرژی مربوط به مسیری است که دمای سیستم از T به T_0 در شرایط فشار ثابت، تغییر می کند و بخش فشاری اکسرژی، مربوط به مسیری است که فشار سیستم از p به p_0 در شرایط دمای ثابت تغییر می کند. این تقسیم بندی در مسیر $a + b$ قابل مشاهده است. هر تقسیم بندی دیگری مانند مسیر $c + d$



شکل ۳. طبقه بندی اکسرژی [۲].

جدول ۲. مقایسه اکسرژی و انرژی

مشخصات اکسرژی	مشخصات انرژی
ترکیبی از قانون اول و دوم ترمودینامیک است.	بر طبق قانون اول ترمودینامیک است.
کار و توانایی تولید کار است.	حرکت یا توانایی تولید حرکت است.
به خواص جریان ماده و انرژی سیستم و شرایط محیط وابسته است.	تنها به خواص جریان ماده و انرژی سیستم وابسته است.
در فرآیندهای برگشت پذیر نه از بین می رود و نه تولید می شود، اما در فرآیندهای واقعی (برگشت ناپذیر) همواره از بین می رود.	نه از بین می رود و نه تولید می شود.
در اشکال مختلف (جنبشی، پتانسیل، کار و گرما) وجود دارد و بر اساس توانایی تولید کار کمی می شود.	در اشکال مختلف (جنبشی، پتانسیل، کار و گرما) کمی می شود.
کمیت و کیفیت انرژی را اندازه می گیرد.	کمیت را اندازه می گیرد.
در شرایطی که سیستم در تعادل کامل با خودش و محیط باشد، مقدار آن صفر است.	در شرایط تعادل با محیط، مقادیر مختلف غیر صفری دارد.

محیطی را بیان می کند. روابط مربوط به اکسرژی ویژه برای جریان های مختلف انرژی در جدول ۱ نشان داده شده است [۴ و ۵].

$$b_1 = h_1 - h_0 + \frac{v_1^2 - v_0^2}{2} + g(z_1 - z_0) + \Delta g_{1,0} + RT_0 \ln \left(\frac{c_1}{c_{1,0}} \right) - T_0(s_1 - s_0) \quad (7)$$

موازنه انرژی اطلاعاتی درباره تغییر در کیفیت انرژی های مختلف و جریان های ورودی و خروجی به یک سامانه نمی دهد. اما اکسرژی به مثابه ابزاری کارآمد در یکپارچه سازی فرآیند (یکپارچه سازی فرآیند) مکان هایی از فرآیند که تخریب انرژی در آن رخ می دهد را به وضوح مشخص می کند و از این جهت، گامی مهم در بهینه سازی و اصلاح فرآیندهای موجود یا طراحی فرآیندهای جدید ایفا می کند. این ابزار ترمودینامیکی در تحلیل سیستم ها با روش های مفهومی و یا ریاضی کاربرد گسترده ای پیدا کرده است (اکسرژی، تحلیل). جدول ۲ تفاوت های بین انرژی و اکسرژی را به طور خلاصه بیان می کند [۶ و ۷].

طبقه بندی اکسرژی

طبقه بندی اکسرژی، با تفاوت کمی مشابه با انرژی است.

$$e_x^{(P)} = T_0 R \ln \frac{P}{P_0} = \frac{k-1}{k} C_p T_0 \ln \frac{p}{P_0} \quad (13)$$

روابط ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند که اکسرژی مستقل از مسیر انتخابی (T_0, P_0) به (T, P) بوده و مؤلفه دمایی اکسرژی، تنها به دمای اولیه و نهایی و مؤلفه فشاری اکسرژی، تنها به فشار اولیه و نهایی بستگی دارد؛ بدین ترتیب با تغییر در دما و فشار می‌توان مؤلفه‌های اکسرژی را تغییر داد و با داشتن یک مقدار اکسرژی کل ثابت، می‌توان از تقابل بین این دو مؤلفه بهره‌برداری کرد.

مداخل مرتبط

آنتروپی؛ انرژی؛ اکسرژی، بازده؛ اکسرژی، تحلیل؛ اکسرژی، حسابداری و اقتصاد؛ اکسرژی، اتلاف؛ بازده انرژی؛ بازده قانون دوم؛ ترمودینامیک؛ چرخه‌های ترمودینامیکی؛ موازنه انرژی.

کتاب‌شناسی

- [1] Rant, Z. "Exergy, a new word for technical available work". *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, vol. 22, 1956.
- [2] Truls, Gundersen. *An Introduction to the Concept of Exergy and Energy Quality*. Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [3] Luis, P. "Exergy as a tool for measuring process intensification in chemical engineering". *Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 88, 2013.
- [4] Suciubba, E. "A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004". *Thermodynamics*, vol. 10, issue. 1, 2007.
- [5] Hermann, Weston A. "Quantifying global exergy resources". *Energy Journal*, vol. 31, 2006.
- [6] Dincer, Ibrahim; Rosen, Marc A. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier, 2007.
- [7] Wall, G. "Exergy, Life and sustainable development". *Problems of Sustainable Development*, vol. 8, iss. 1, 2013.

محمدحسن پنجه‌شاهی و نسیم طاهونی

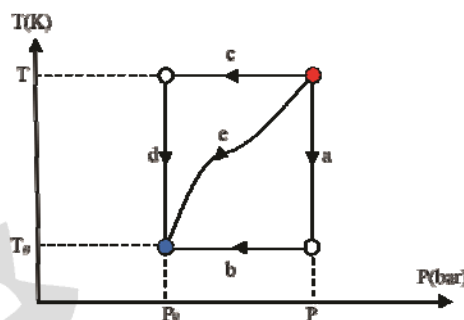
منجر به دو مسیر متفاوت دمایی و فشاری خواهد شد، اما تغییر نهایی اکسرژی آن ثابت می‌ماند که این موضوع ناشی از این واقعیت است که اکسرژی تابع حالت ترمودینامیکی است [۲].

دو عبارت عمومی ۸ و ۹ برای محاسبه دو مؤلفه اکسرژی سیستم شکل ۴ از حالت ۱ به ۲ به کار می‌رود.

$$e_x^{(T)} = [h(T, p) - h(T_0, p)] - T_0 [s(T, p) - s(T_0, p)] \quad (8)$$

$$e_x^{(p)} = [h(T_0, p) - h(T_0, p_0)] - T_0 [s(T_0, p) - s(T_0, p_0)] \quad (9)$$

برای گاز کامل، مطابق با روابط ۱۰ و ۱۱ آنتالپی تنها تابعی از دما است و آنتروپی تابعی از هر دو متغیر دما و فشار است. با فرض ظرفیت گرمایی (C_p) ثابت، می‌توان بین دو حالت (T_0, p_0) و (T, p) انتگرال گرفت.



شکل ۴. تقسیم اکسرژی ترمودینامیکی به دو بخش [۲].

$$h - h_0 = C_p \times (T - T_0) \quad (10)$$

$$ds = C_p(T) \cdot \frac{dT}{T} - R \cdot \frac{dp}{p} \quad C_p s - s_0 = C_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0} \quad (11)$$

بدین ترتیب دو عبارت اکسرژی فشاری و دمایی برای گاز ایدئال با ظرفیت گرمایی ثابت به صورت دو رابطه ۱۲ و ۱۳ نوشته می‌شود $(k = C_p/C_v)$.

$$(12)$$

$$e_x^{(T)} = C_p \left[T - T_0 \left(1 + \ln \frac{T}{T_0} \right) \right] = (h - h_0) \left(1 - \frac{T_0}{T_{LM}(T_0 \& T)} \right)$$