

## جایگاه انتروپی در مهندسی و علوم

محمد خشنودی

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

**چکیده:** این مقاله به تاریخ و روند شکل‌گیری اصول بنیادی ترمودینامیک به ویژه مفهوم انتروپی می‌پردازد. در بخش نخست با تقویم‌نگاری از انقلاب صنعتی در اروپا و اختراع ماشین‌های بخار و گرمایی برای تبدیل حرارت به کار، چگونگی بهبود بازدهی آنها به ویژه تلاش‌های سعدی کارنو در دهه ۱۸۲۰ تشریح و یافته‌ها و نیز اشکالات نظری وی بررسی می‌شود. تنظیم و نشر اندیشه‌های کارنو توسط کلاسیوس در دهه ۱۸۵۰ و معرفی واژه انتروپی و کاربردهای اولیه آن توضیح داده می‌شود. همزمان شکل‌گیری قانون اول ترمودینامیک توسط ژول و مایر بررسی شده و سپس کوشش‌های کلوین و پلانک برای تنظیم قانون دوم ترمودینامیک شرح داده می‌شود. گسترش کاربردهای انتروپی توسط هلمهولتز و گیبس و سپس شکل‌گیری قانون سوم ترمودینامیک توسط نرنست، پلانک و اینشتین در سال ۱۹۰۶ توضیح داده می‌شود. از طرف دیگر بیان مفهوم آماری انتروپی توسط بولتزمن و تأثیر پیشرفت‌های شگرف فیزیک در شناخت میکروسکوپیک ماده، مراحل شکل‌گیری ترمودینامیک آماری (۱۹۰۰)، مکانیک آماری (۱۹۱۰)، سپس مکانیک کوانتوم آماری (۱۹۲۵) و سرانجام نظریه اطلاعات (۱۹۴۸) شرح داده می‌شود.

در بخش دوم کاربردهای مهم انتروپی در تعریف فرایندهای آرمانی، محاسبه بازدهی ماشین‌های حقیقی و میزان بازگشت‌ناپذیری در آنها، اصل افزایش انتروپی، مفهوم اکسرژی و قابلیت کاردهی، معرفی کمیت‌های جدید ترمودینامیکی چون خواص جزئی و اضافی، پتانسیل شیمیایی و اکتیویته، مفهوم تعادل، نگانتروپی، نظریه اطلاعات و سنجش دما شرح داده می‌شود.

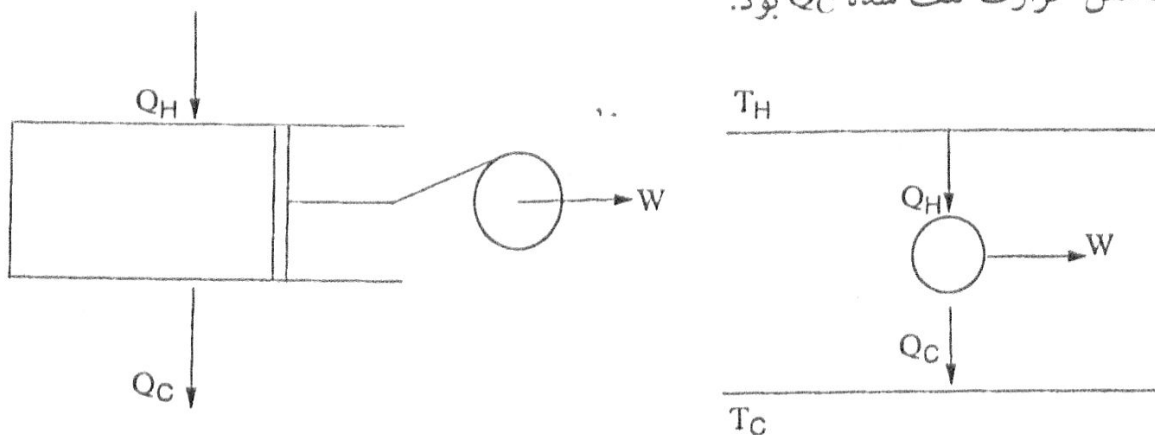
در پایان به کاربردهای نوین انتروپی در بررسی سیستم‌های زنده، علوم انسانی، جامعه‌شناسی و تاریخ اشاره می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** ترمودینامیک، قوانین ترمودینامیک، انتروپی، تاریخ ترمودینامیک، تاریخ علوم.

## ۱. شکل‌گیری ترمودینامیک (۱۸۰۰)

ساده‌ترین تعریف ترمودینامیک دانش تبدیل انرژی گرمایی به انرژی مکانیکی یا تبدیل حرارت به کار است. اما در یک تعریف جامع‌تر، تبدیل همه اشکال انرژی به یکدیگر، بررسی ماشین‌های گرمایی و نیروگاهها، ماشین‌های سرمازا و سیستم‌های تهویه مطبوع و نیز تعادل فازهای گاز به مایع، جامد، محلول‌ها، و آمیزه‌های چندجزیی، تعادل واکنش‌های شیمیایی همگن و ناهمگن و بررسی دماهای بسیار کم (کریوژنیک) و دماهای بسیار زیاد (پلازما) را در بر می‌گیرد. این بررسی ممکن است از دیدگاه کلان و ماکروسکوپی (ترمودینامیک کلاسیک) یا مطالعه خواص میکروسکوپی ماده (ترمودینامیک آماری) باشد.

شکل‌گیری ترمودینامیک به آغاز انقلاب صنعتی در اروپا و نخستین سالهای قرن نوزدهم میلادی برمی‌گردد. یعنی هنگامی که استخراج زغال‌سنگ، ساخت کوره‌های تولید فولاد و سپس به کارگیری ماشین بخار برای تولید توان و جابجایی، تمدن بشر را دگرگون ساخت. در آن دوران مخترعین و صنعتگران در انگلستان، آلمان و فرانسه برای طراحی، ساخت و بهبود انواع ماشین‌های گرمایی تلاش فراوان کردند. طرح ساده یک ماشین گرمایی که بر اساس انبساط گاز درون یک سیلندر - پیستون کار می‌کند در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این ماشینها انواع سیکل یا چرخه ترمودینامیکی چون سیکل کارنو، رانکین، برایتون، استرلینگ و... برای تبدیل گرمای ورودی  $Q_H$  به کار خروجی  $W$  معرفی و آزموده شد. هدف همه این ماشینها افزایش بازده  $\eta$  و کاهش حرارت تلف شده  $Q_C$  بود.



$$\eta = \frac{W}{Q_H}$$

شکل ۱. نمایش یک ماشین گرمایی برای تبدیل گرما به کار

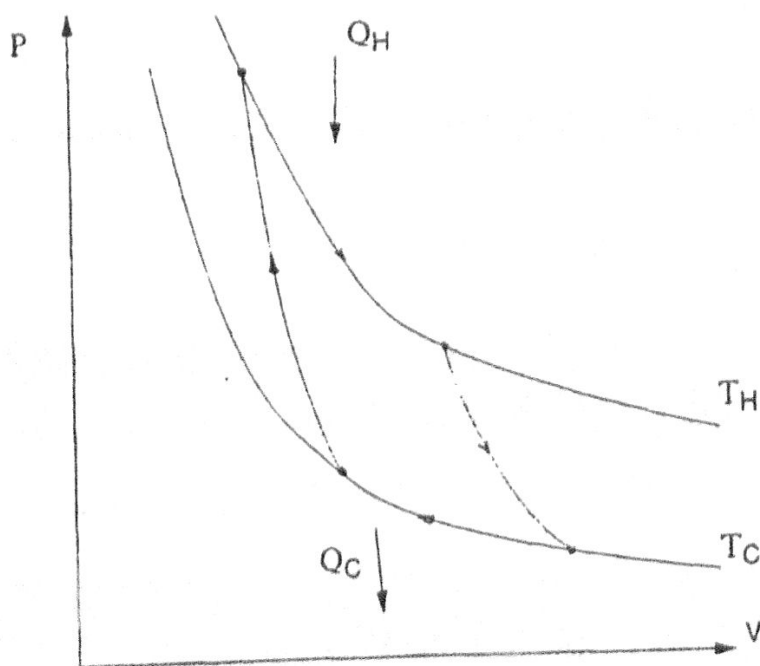
## ۲. سعدی کارنو در فرانسه (۱۸۱۰)

سعدی کارنو مهندس جوان در ارتش فرانسه از پیشگامان بررسی نظری تبدیل حرارت به کار است. تلاش وی در فاصله سالهای ۱۸۱۰ تا ۱۸۳۰ منجر به یافتن بیشترین بازده ممکن در ماشین گرمایی شد. این نتیجه که امروزه به عنوان یکی از بیان‌های قانون دوم ترمودینامیک شناخته می‌شود، از نظر ترتیب تاریخی بر دیگر قوانین ترمودینامیک مقدم است و شاید درست تر باشد که آن را قانون اول دانست.

### ۱.۲. یافته‌های کارنو

مهمترین دستاوردهای کارنو به شرح زیر است:

۱. در ماشین گرمایی تبادل گرما تنها با یک منبع گرم سیکل را کامل نمی‌کند.
۲. ماشین گرمایی با سیکل کامل به یک منبع گرم و یک چاهک سرد نیاز دارد.
۳. ماشین گرمایی نظری و ایده‌آل کارنو دارای گاز آرمانی ( $PV=nRT$ ) است و سیکل چهارهنگامه کارنو شامل دو فرایند هم‌دما و دو فرایند آدیاباتیکی را به صورت برگشت پذیر می‌پیماید. در سیکل کارنو که در شکل (۲) نمایش داده شده است، بیشترین کار ممکن در فاصله دمایی  $\Delta T$  معین به دست می‌آید، اما زمان پیمایش سیکل بی‌نهایت طولانی پس توان آن صفر است.



شکل ۲. سیکل چهارهنگامه کارنو برای تولید کار بیشینه

۴. با یک منبع گرمایی در دمای  $T_H$  و یک چاهک سرد در دمای  $T_C$  بیشترین بازده ممکن توسط ماشین گرمایی کارنو به دست می‌آید که وی آن را به صورت زیر محاسبه کرد (۱۸۲۴):

$$\eta_C = \frac{T_H - T_C}{T_H}$$

۵. ویژگی مهم این بازده آن است که تنها به دو کمیت  $T_H$  و  $T_C$  وابسته است و به نوع سیکل یا خواص گاز بستگی ندارد.

۶. کارنو این نتایج را تنها بر اساس استدلال منطقی و بدون تجربه عملی به دست آورد.

## ۲.۲. اشکالات مدار کارنو

امروزه مهمترین اشکالات مدار کارنو را چنین می‌توان نوشت:

### ۱.۲.۲. تأثیر نظریه گرمایی کالریک

حدود یک قرن پیش از کارنو اشتال شیمیدان آلمانی نظریه فلوریزستون یا ماده آتش را معرفی کرد که هنگام سوختن مواد آزاد می‌شود. سپس این نظریه توسط لاوازیه بنیانگذار شیمی نوین در فرانسه اصلاح شد که در سال ۱۷۷۵ نظریه گرمایی کالریک را ارائه کرد. بر اساس آن دلیل گرم بودن مواد وجود سیالی روان و بی‌وزن است که لاوازیه آن را کالریک نام نهاد. نظریه گرمایی کالریک تا اواسط قرن نوزدهم معتبر شمرده می‌شد. جالب است که کارنو با همین برداشت از مفهوم گرما نتایج ارزشمند خود را به دست آورد.

### ۲.۲.۲. روشن نبودن قانون اول ترمودینامیک

به خاطر روشن نبودن مفاهیم گرما  $Q$ ، کار  $W$  و انرژی  $E$  اصل پایستگی انرژی یا آنچه امروزه قانون اول ترمودینامیک نامیده می‌شود، توسط کارنو به کار برده نشد. به زبان ساده روابط بنیادی زیر برای کارنو روشن نبوده است.

$$Q = W + \Delta E \quad \text{در فرایند}$$

$$Q_H = W + Q_C \quad \text{در سیکل}$$

هم جنس بودن  $Q$ ،  $W$  و  $E$  و اصل پایستگی انرژی در یک دوره طولانی و با چالشهای نوآندیشانی چون رامفورد (سال ۱۸۰۰)، فوریه (سال ۱۸۲۰)، واترستون (سال ۱۸۴۰)، مایر (سال ۱۸۴۵) و سرانجام ژول (سال ۱۸۵۰) تثبیت شده است.

### ۳.۲.۲. مقایسه ماشین گرمایی با توربین

کارنو جریان گرما از درون ماشین گرمایی و تولید کار را همچون جریان آب از درون توربین آب در یک سد می پنداشت. یعنی توان تولیدی  $\dot{W}$  را با شدت جریان آب  $\dot{m}$  و اختلاف ارتفاع  $\Delta Z$  متناسب می دانست.

$$\dot{W} = \dot{m}g(Z_1 - Z_2)$$

در حقیقت گرمای وارد شده و خارج شده ماشین را چون جریان آب توربین ثابت فرض کرده و پایستگی سیال کالریک را رعایت می نمود، یعنی  $Q_H = Q_C$  سپس

$$\dot{W} = \dot{Q}_H \cdot \eta$$

$$\dot{W} = \dot{Q}_H \frac{1}{T_H} (T_H - T_C)$$

این فرض این تناقض اساسی را در پی دارد که با  $\Delta T$  یکسان در  $T_H$  بالاتر کار به دست آمده کمتر است، حال آنکه در توربین آب چنین نیست و با  $\Delta Z$  یکسان کار معینی به دست می آید و به  $Z$  بستگی ندارد.

### ۳. رودلف کلاسیوس در آلمان (سال ۱۸۵۰)

اهمیت نظریات کارنو در زمان خود او چندان شناخته نشد. در اواسط قرن نوزدهم کلاسیوس نوشته های کارنو را به آلمانی برگرداند و به چاپ رساند. نقش کلاسیوس در بنانهادن ترمودینامیک کلاسیک، نخست معرفی و نشر اندیشه های کارنو و سپس معرفی واژه انتروپی  $S$  در سال ۱۸۵۴ است. کلاسیوس رابطه کارنو را به صورت زیر اصلاح نمود.

$$\dot{W} = \frac{\dot{Q}}{T_H} \Delta T$$

$$\dot{W} = \dot{S} \cdot \Delta T$$

در حقیقت آنچه در ماشین گرمایی برگشت پذیر بایسته می ماند، جریان گرما نیست بلکه جریان انتروپی است.

مهمترین دستاوردهای کلاسیوس را می توان چنین بیان کرد:

۱. معرفی کمیت انتروپی  $\left(\frac{J}{K}\right)$  گرما  

$$S = \frac{Q}{T}$$

۲. نابرابری کلاسیوس در سیکل ها  

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

۳. مختصه انتروپی تابع حالت است مانند فشار  $P$ ، دما  $T$ ، انرژی  $U$  و انتالیپی  $H$

۴. محاسبه تغییر انتروپی در فرایند برگشت پذیر

$$\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev}$$

۵. محاسبه تغییر انتروپی در فرایند بازگشت ناپذیر

$$DS = \frac{\delta Q + I}{T}$$

۶. محاسبه بازگشت ناپذیری ( $I$ ) و کار هدر رفته ( $W_L$ ) که در اثر اصطکاک، آمیختن، انتقال حرارت، انبساط آزاد، احتراق و ... پدید می آید.

۷. اصل افزایش انتروپی که همه فرایندها و سیکل ها منجر به افزایش انتروپی جهان می شوند؛ یعنی:

$$\Delta S_{کل} = \Delta S_{سیستم} + \Delta S_{محیط} \geq 0 \quad \text{در فرایند}$$

$$\Delta S_{کل} = \Delta S_{محیط} \geq 0 \quad \text{در سیکل} \quad \Delta S_{سیستم} = 0$$

۴. ویلیام تامسون (لرد کلونین) در انگلستان (سال ۱۸۸۰)

از دیگر بنیانگذاران ترمودینامیک کلونین است که بر اساس ماشین گرمایی آرمانی مقیاس دمای کلونین را بنا نهاد و رابطه اساسی زیر را اثبات کرد.

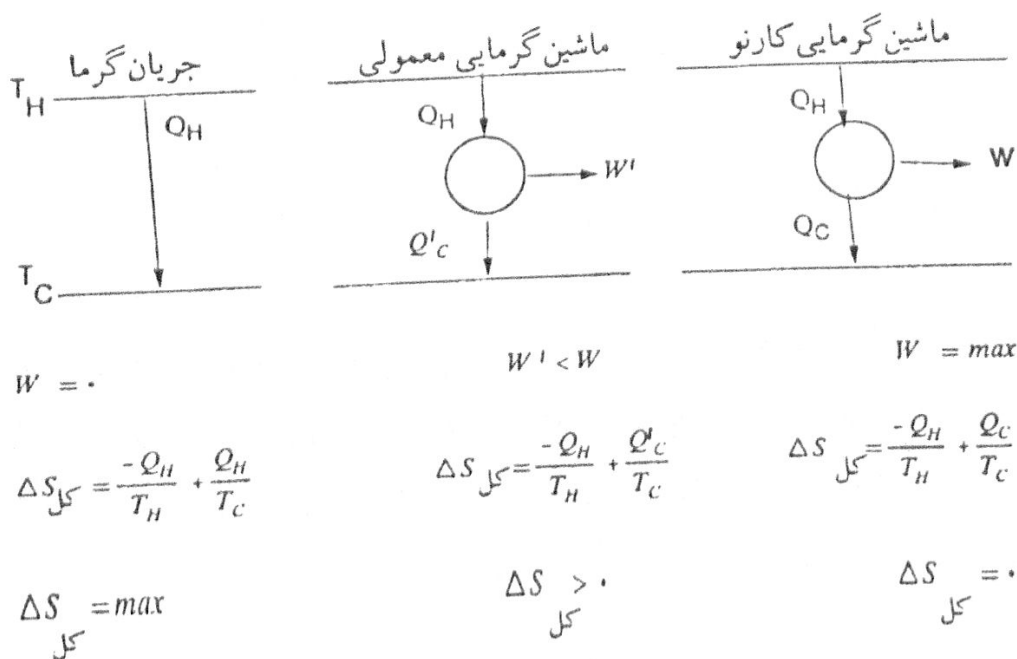
$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C}$$

کاربرد این رابطه در سیکل کارنو به صورت زیر است:

$$S_H = \frac{Q_H}{T_H} \quad S_C = \frac{Q_C}{T_C} \quad -S_H = S_C$$

$$\Delta S_{\text{سیستم}} = 0 \quad \Delta S_{\text{محیط}} = -S_H + S_C = 0 \quad \Delta S_{\text{کل}} = 0$$

کاربرد رابطه کلونین در حالت کلی و برای همه ماشینها در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳. نمایش جریان گرما و تولید کار در انواع ماشینهای گرمایی

## ۵. تنظیم قانونهای ترمودینامیک

۱. نتیجه قانون اول: مفهوم انرژی، یکی بودن اشکال مختلف آن و هم جنس بودن آن با کار و گرما. اصل پایستگی برای سیستمهای بسته

$$\Delta E = Q - W \quad \text{انرژی}$$

۲. نتیجه قانون دوم: مفهوم انتروپی و اصل افزایش انتروپی  $\Delta S_{\text{کل}} \geq 0$

۳. بیانهای مختلف قانون دوم

● ماشین گرمایی با بازده صددرصد امکان پذیر نیست. یا کار به گرما کاملاً تبدیل

می شود (اصطکاک)، اما تبدیل کامل گرما به کار در یک چرخه یا سیکل امکان پذیر نیست (پلانک - کلوین).

- ماشین گرمایی کارنو با در نظر گرفتن دماهای  $T_C$  و  $T_H$
- جریان گرما از دمای کم به دمای زیاد نیاز به کار دارد، اما در جهت عکس خودبه خودی است (کلاسیوس).

- همه فرایندها و سیکل‌ها برگشت ناپذیرند (کلاسیوس)
- همه فرایندها و سیکل‌ها افزایش انتروپی به بار می آورند (کلاسیوس)

۴. هلمهولتز در آلمان: معرفی مفهوم انرژی آزاد  $A = U - TS$

۵. گیبس در آمریکا: معرفی مفهوم انرژی دسترس پذیر  $G = H - TS$

۶. نرنست در آلمان: معرفی مفهوم انرژی نقطه صفر  $H_0 = \frac{h^2}{m\lambda^2}$

- در دمای صفر مطلق حرکات کلی (انتقالی، چرخشی، نوسان) ذره به صفر می گراید.

- در دمای صفر مطلق حرکات درون ذره‌ای (چرخش و اسپین الکترون‌ها و ذرات هسته‌ای) صفر نیست، بلکه انرژی نقطه صفر یا گرماي نرنست  $H_0$  نام دارد. (h ثابت پلانک، m جرم و  $\lambda$  اندازه شبکه تبلور است)

۷. قانون سوم ترمودینامیک: نرنست، پلانک و اینشتین (سال ۱۹۰۶). در دمای صفر مطلق انتروپی ماده به صفر و انرژی آن به انرژی نقطه صفر می گراید.

$$T \rightarrow 0 \quad S \rightarrow 0 \quad T \rightarrow H_0$$

۸. قانون صفر ترمودینامیک: اصل برابری دمای دماسنج‌ها در دمای معین.

## ۶. بولتزمن در آلمان (۱۹۰۰)

معرفی کمیت انتروپی توسط کلاسیوس تنها علوم حرارتی را در بر می گرفت. اما به زودی دریافته شد که قانون دوم و مفهوم انتروپی دامنه کاربرد بسیار گسترده تری دارد. بولتزمن از بنیانگذاران ترمودینامیک آماری کمیت انتروپی را به معنی بی نظمی به صورت یک مفهوم آماری چنین بیان



کرد.

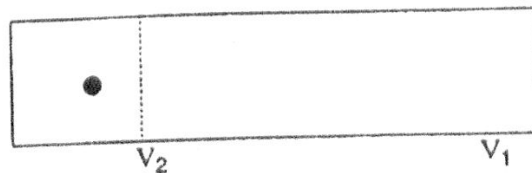
$$S = k \ln \omega$$

در این رابطه  $S$  انتروپی سیستم در وضعیت با احتمال  $\omega$  است.  $k$  یا ثابت بولتزمن در سیستم میکروسکوپی همان نقشی را داراست که  $R$  ثابت جهانی گاز در سیستم ماکروسکوپی دارد

$$k = R/N_0$$

$$R = 8/314 \text{ J/mol.K} \quad N_0 = 6/023 \times 10^{23} \quad k = 1/38 \times 10^{23} \text{ J/mol.K}$$

رابطه یک سیستم میکروسکوپی (مولکول) با یک سیستم ماکروسکوپی (مول) در شکل (۴) نمایش داده شده است.



$$\omega = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\omega = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{N_0}$$

$$\ln \omega = N_0 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$k \ln \omega = \left(\frac{R}{N_0}\right) N_0 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\Delta S = R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

تراکم همدم

$$\Delta S = k \ln \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

شکل ۴. رابطه احتمال و انتروپی برای یک مولکول و یک مول گاز

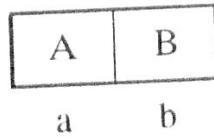
بنابر اصل افزایش انتروپی گرایش سیستم از حالت کم احتمال  $\omega_1$  به حالت پراحتمال  $\omega_2$  خودبه خودی است؛ یعنی:

$$\omega_2 > \omega_1 \rightarrow \Delta S > 0$$

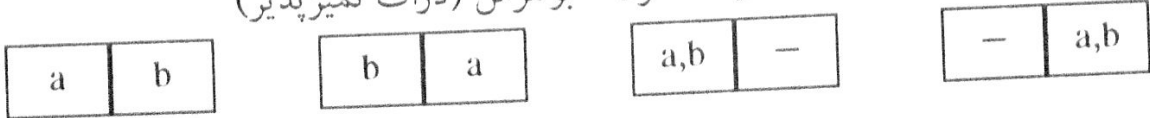
## ۷. گسترش مفهوم انتروپی

از آغاز قرن بیستم و با پیشرفتهای شگرف فیزیک مدرن و شناخت بهتر ماده کمیت انتروپی نیز مفهوم گسترده تری یافته است. شکل (۵) سیر تحول ترمودینامیک آماری به مکانیک آماری و

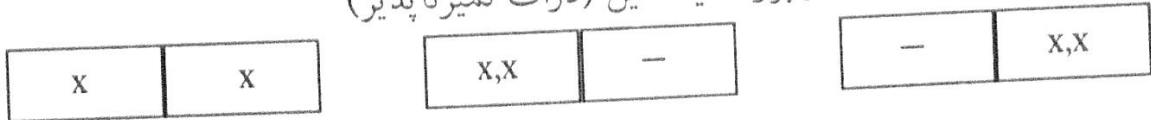
سپس به مکانیک کوانتوم آماری را نمایش می دهد. در این شکل احتمال حضور دو ذره a و b در دو سوی پرده درون یک ظرف با توجه به محدودیتهای هر نوع آمار نمایش داده شده است.



۱۹۰۰ - ترمودینامیک آماری: آمار ماکسول - بولتزمن (ذرات تمیزپذیر)



۱۹۱۰ - مکانیک آماری: آمار بوز - اینشتاین (ذرات تمیزناپذیر)



۱۹۲۵ - مکانیک کوانتم آماری: آمار فرمی - دیراک (اصل طرد پاولی)



شکل ۵. وضعیت دو ذره درون یک ظرف با دو جایگاه

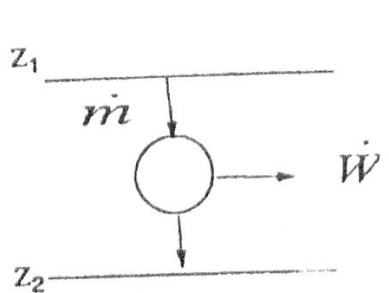
- کاراتئودوری (۱۹۲۵) با یک مفهوم ریاضی کاربرد انترویی را تعمیم داد.
  - سپس لئوزیلارد (۱۹۳۰) رابطه انترویی و اطلاعات را نشان داد.
  - سرانجام کلود شانون (۱۹۴۸) نظریه اطلاعات را ارائه کرد.
- بر مبنای یک دیدگاه فراگیر، افزایش انترویی سیستم در حقیقت کاهش اطلاعات (I) در باره سیستم است.

## ۸. کاربردهای انترویی

امروزه از کمیت انترویی در زمینه های مختلف علوم و مهندسی استفاده می شود. مهمترین کاربردهای انترویی چنین است.

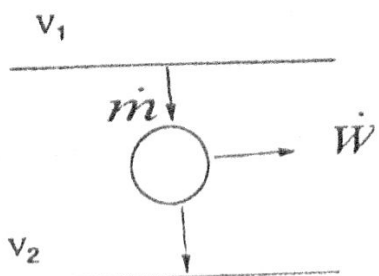
۱.۸. تعیین فرایندهای آرمانی

محاسبه کار بیشینه ایزنتروپیک  $\dot{W}_s$ . در شکل (۶) توان بیشینه به دست آمده از سقوط آب با دبی  $\dot{m} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  در اختلاف ارتفاع  $\Delta Z$  نشان داده شده است. روشن است توان لازم کمینه برای بالا فرستادن همان مقدار آب به همان بلندی برابر  $-\dot{W}_s^0$  می باشد. همچنین در شکل توان ایزنتروپیک توربین پلتون (وارونه آن دمنده) بر حسب اختلاف سرعت  $V$ ، توربین فرانسیس (وارونه آن پمپ باد) بر حسب اختلاف فشار  $P$  و توربین بخار (وارونه آن کمپرسور گاز) بر حسب اختلاف انتالی  $h$  نمایش داده شده است.



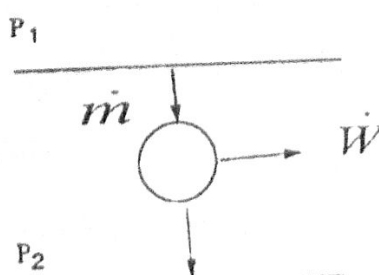
توربین آب (وارونه: پمپ آب)

$$\dot{W}_s = \dot{m} g (z_1 - z_2)$$



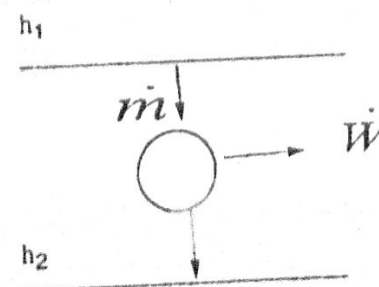
توربین باد، پلتون (وارونه: پنکه، دمنده)

$$\dot{W}_s = \frac{1}{2} \dot{m} (V_1^2 - V_2^2)$$



توربین فرانسیس (وارونه: پمپ باد، ملخ)

$$\dot{W}_s = \dot{m} v (P_1 - P_2)$$



توربین بخار (وارونه: کمپرسور گاز)

$$\dot{W}_s = \dot{m} (h_1 - h_2)$$

شکل ۶. محاسبه توان بیشینه ایزنتروپیک

## ۲.۸. مقایسه ماشینهای آرمانی و حقیقی

بر اساس محاسبه توان ایزنتروپیک  $\dot{W}_s$  و اندازه گیری توان به دست آمده حقیقی  $\dot{W}_a$  می توان کارایی ماشینهای حقیقی را محاسبه نمود.

$$\eta = \frac{W_a}{W_s} \quad \text{توربین} \quad \eta = \frac{W_s}{W_a} \quad \text{کمپرسور}$$

## ۳.۸. محاسبه میزان بازگشت ناپذیری (I)

با توجه به معلوم شدن  $W_s$  و  $W_a$  میزان بازگشت ناپذیری در فرایندها و سیکل ها نیز قابل محاسبه است.

$$W_s - W_a = I \quad \text{کل } I = T_0 \cdot \Delta S$$

## ۴.۸. کاربرد اکسرژی یا قابلیت کاردهی (دسترس پذیری)

$$G = H - TS$$

اینرژی - انرژی = اکسرژی

بر این اساس محاسبات بررسی اکسرژی سیستمها متداول شده است.

## ۵.۸. کاربرد اصل افزایش انتروپی

با توجه به این اصل بنیادی و امکان محاسبه و تعیین علامت  $\Delta S$  می توان موارد زیر را تشخیص داد:

- فرایندهای شدنی و نشدنی
- جهت فرایندهای خودبه خودی (افتادن گلوله، زنگ زدن آهن، پیر شدن و ...)
- جهت پیکان زمان و در حقیقت موقعیت پس و پیش

## ۶.۸. معرفی کمیت های جدید ترمودینامیکی

بر اساس مفهوم انتروپی کمیت های جدیدی معرفی شده است که بررسی وضعیت تعادل فازهای گاز، مایع، جامد، محلولها، آلیاژها، آمیزه های چندتایی، تعادل واکنش های شیمیایی را امکان پذیر

ساخته است. مهمترین این کمیت‌ها عبارتند از:

● خواص جزئی<sup>۱</sup> یا خواص ماده در آمیزه‌ها  $\bar{M}_i$

● خواص باقی مانده<sup>۲</sup>

● خواص اضافی<sup>۳</sup>

● پتانسیل شیمیایی

● ضریب فوگاسیته

● ضریب اکتیویته

$$M^R = M - M^{ig}$$

$$M^E = M - M^{id}$$

$$\mu_i = \bar{G}_i$$

$$\varphi = f(z)$$

$$\gamma = f(g^E)$$

### ۷.۸. شناخت مفهوم تعادل

امروزه شناخت و بررسی حالت تعادل در محاسبات شیمی فیزیک بر اساس مفهوم انتروپی و کمیت‌های مشتق شده از آن چون انرژی آزاد گیبس  $G$  و پتانسیل شیمیایی  $\mu$  انجام می‌شود.

● تعادل فازها: برابری پتانسیل شیمیایی هر ماده در فازها  $\mu_i^\alpha = \mu_i^\beta$

● تعادل واکنش‌ها: برابری پتانسیل شیمیایی واکنش‌گران (R) و فرآورده‌ها (P)

$$\sum_i (\nu_i \mu)_{R} = \sum_j (\nu_j \mu)_{P}$$

● تعادل سیستم‌های ناهمگن (چندفاز، چندواکنش)

● کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس

● روش جستجوی مستقیم

● نرم‌افزارهای پیشرفته مانند ASPEN و PROvision

$$d(G^I) = 0$$

$$G^I = \min$$

### ۸.۸. نظریه اطلاعات

بر اساس مفهوم انتروپی افزایش انتروپی سیستم با کاهش اطلاعات در باره سیستم برابر است.

بنابراین، کمترین بی‌نظمی یا بیشترین نظم یا بیشترین اطلاعات در صفر مطلق است. به زبان دیگر

$$I_0 < I_{\text{جامد}} < I_{\text{مایع}} < I_{\text{گاز}}$$

$$S_g > S_l > S_s > S_0$$

### ۹.۸. مفهوم نگانتروپی یا انتروپی منفی

پیشنهاد شده است که با وارونه کردن مفهوم انتروپی (بی‌نظمی)، کمیت نگانتروپی (نظم) را به کار برد. بدین ترتیب، پیامدهای آن چنین خواهد بود:

- اصل کاهش نگانتروپی
- اصل کاهش اکسرژی
- اصل کاهش قابلیت کاردهی یا دسترس پذیری

### ۱۰.۸. مقیاس سنجش دما

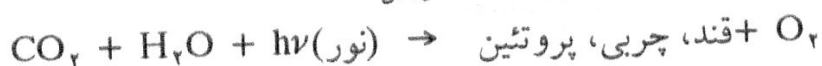
از پیشرفته‌ترین مقیاس‌های سنجش دما، مقیاس دمای انرژی گاز آرمانی (IGE) است که توسط گرگوریان (در سال ۱۹۶۴) پیشنهاد شده است. در این مقیاس، دمای آب جوش  $3100 \text{ G} \left( \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right)$  و دمای آب یخ  $2270 \text{ G}$  و فاصله آنها  $830 \text{ G}$  و دمای بدن انسان  $2600 \text{ G}$  می‌باشد. در صورت کاربرد این مقیاس دما مطالعه ترمودینامیک بسیار ساده‌تر می‌شود، چون ثابت جهانی گاز (بدون بعد)  $R=1$  و (بدون بعد)  $C_p - C_v = 1$  و انتروپی (بدون بعد) کسری از انرژی سیستم در حرکت تصادفی خواهد بود.

## ۹. گسترش کاربردها

### ۱.۹. انتروپی در سیستم‌های زنده

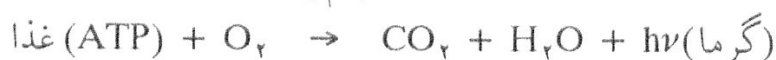
سرچشمه حیات در روی زمین نور خورشید است. گیاهان سبز در فرایند فوتوسنتز آب و دی‌اکسیدکربن را به مولکول‌های سنگین پروتئین، چربی و قند یعنی غذا تبدیل می‌کنند. در حقیقت نور خورشید به صورت انرژی شیمیایی در پیوندهای مولکولی ذخیره می‌شود.

کلروفیل



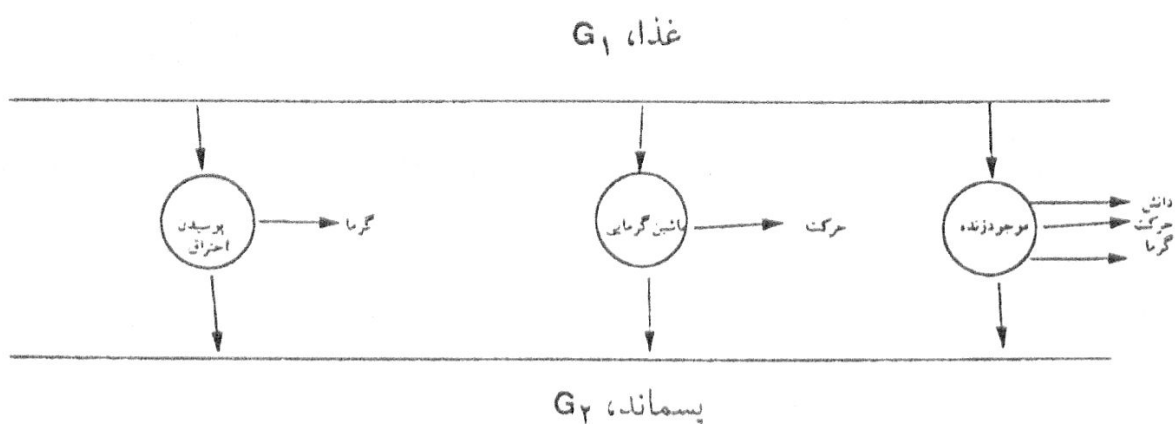
موجودات زنده با خوردن و هضم غذا مولکولهای درشت را شکسته و دوباره آن را به دی اکسیدکربن و آب برمی گردانند. انرژی پیوندها نیز به صورت گرما، حرکت و اطلاعات به مصرف زندگی می رسد.

سیستم زنده



تبدیل غذا به پسماند و آزاد شدن انرژی می تواند به صورت های زیر باشد:

- پوسیدن یا احتراق کند و تولید گرما
  - احتراق در ماشین گرمایی و تولید حرکت و گرما
  - هضم در سیستم زنده و تولید حرکت، گرما و اطلاعات
- شکل (۷) این فرایندها را در مقایسه با کار ماشین گرمایی نمایش می دهد.



$$\dot{W}_s = \dot{m} (G_1 - G_2)$$

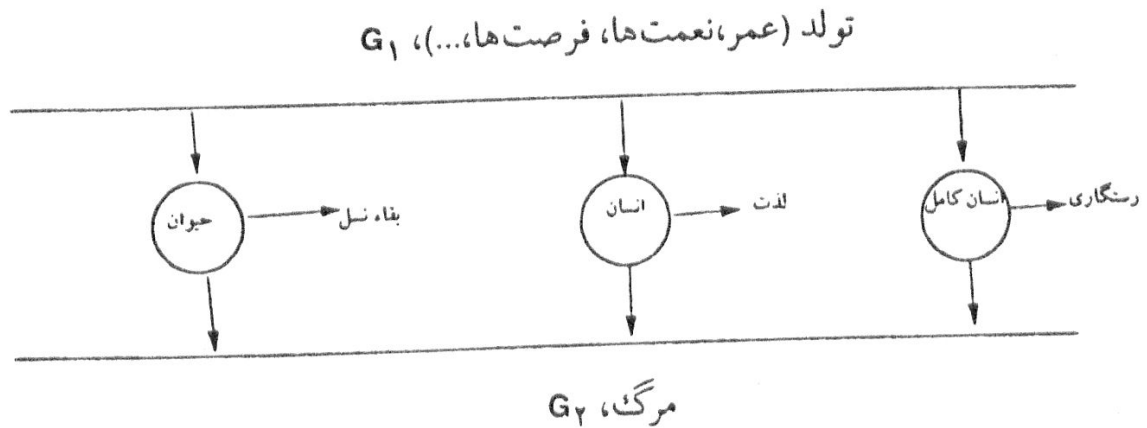
شکل ۷. نمایش تبدیل مولکول پرانرژی به پسماند کم انرژی

در این شکل  $\dot{W}_s$  توان بیشینه ایزنتروپیک می باشد. اگر بازده کلی فرایند تبدیل غذا به عضله ۱۰٪ باشد بازده گیاه خواران ۱۰٪ و بازده گوشت خواران تنها ۱٪ خواهد بود. آیا با توجه به مفهوم انتروپی می توان توان بیشینه انسان مثلاً برای دویدن سریع ترین دو صد متر (۹/۹۵) یا بالاترین پرش ارتفاع (۲/۵۴cm) یا بیشترین جذب اطلاعات از محیط یعنی آموختن انواع مهارتها (مانند ورزشها، موسیقی، زبان های خارجی و ...) و یا حداکثر توانایی تولید دانش (اختراع، اکتشاف،

آگاهی، ... را محاسبه کرد؟

۲.۹. انترویی، انسان و اخلاق

فرایند زندگی حیوان، انسان و انسان کامل (ابرمرد<sup>۱</sup>) را به طور خلاصه به صورت شکل (۸) می توان نمایش داد.



شکل ۸. چالش انسان برای بهبود کیفیت زندگی و دستیابی به کمال

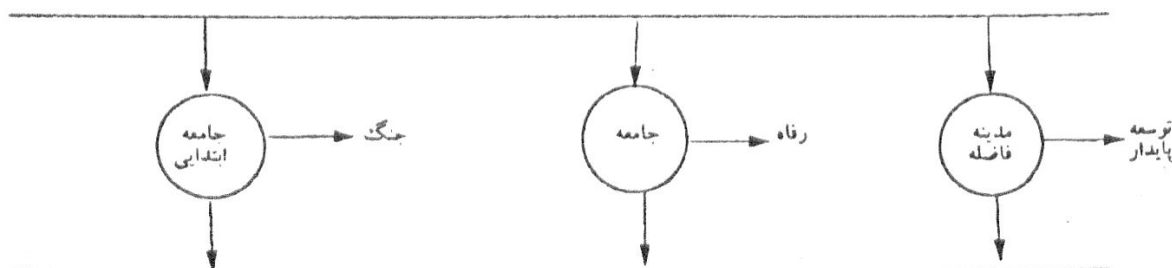
حیات حیوان به منظور بقا نسل، توأم با کسب کمترین معرفت و در نتیجه همراه با بیشترین افزایش انترویی است. از سوی دیگر انسان کامل در مدت زندگی خود حداکثر معرفت را جذب و کمترین مقدار انترویی به بار می آورد و به بالاترین هدف ممکن؛ یعنی رستگاری، کمال و شادزیستن می رسد. انسان معمولی در میانه این دو وضعیت گرفتار و در پی لذات جسمانی است. هدف پیامبران و آموزگاران اخلاق راهنمایی انسان در سوق از زندگی حیوانی به سوی کمال و اعتلای کیفیت زندگی اوست.

۳.۹. انترویی در جامعه شناسی و تاریخ

در مورد جامعه انسانی، نیروی پیش‌راندنده تاریخ، کمال بشریت شاید شکل (۹) گویا باشد



## قدرت (جمعیت، ثروت، دانش، ...)، G



شکل ۹. نمایش پیشرفت تاریخ

در یک جامعه ابتدایی پتانسیل‌های گوناگون منجر به جنگ می‌شود. در جامعه معمولی استعدادها و توانایی‌ها به مصرف رفاه عمومی می‌رسد و در یک جامعه آرمانی یا مدینه فاضله توسعه پایدار، فراگیر و همه‌جانبه مقصد نهایی می‌باشد. هدف ادیان، رهنمود مکتب‌های فلسفی و جامعه‌شناسی، و اندیشه رهبران سیاسی در این زمینه است. چگونه می‌توان به کمک مفهوم انتروپی این فرایندهای اجتماعی تاریخی را قانونمند ساخت؟

مقاله را با توصیه اسلام برای رستگاری انسان و اعتلای جامعه بشری که به بهترین صورت در سوره مبارکه والعصر بیان شده است، به پایان می‌بریم. قسم به زمان که انسان پیوسته در حال ضرر و زیان است. مگر آنانی که ایمان آوردند، نیکوکاری کردند، به حق گرویدند و صبر پیشه ساختند.

## مراجع

۱. جان هودسون، تاریخ شیمی، ترجمه احمد خواجه‌نصیر طوسی، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۴.
۲. کورت مندلسون، صفر مطلق، ترجمه مرتضی قریب، انتشارات انجمن فیزیک ایران، ۱۳۷۱.
۳. یا. آ. اسمورودنیسکی، دما، ترجمه لطیف کاشیگر، انتشارات انجمن فیزیک ایران، ۱۳۷۲.
۴. مهدی بهادری نژاد، "عشق و انتروپی و راه زندگی"، نشریه شریف، سال دهم، شماره ۹، ۱۳۷۳.
۵. مهدی بهادری نژاد، شادی و زندگی، تهران، چاپ دوم، نشر دایره، ۱۳۷۸.
۶. آرتور دانووان. لاوازیه، علم - دولت - انقلاب، ترجمه حسن افشار، نشر مرکز، ۱۳۷۷.
7. J.M. Smigh, H.C. Van Ness and M.M. Abbott, Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 5th. ed. McGraw-Hill, 1996.