

قانون دوم ترمودینامیک

mamwad@mailaps.org

محمد خرمی

بیان ی از قانون دوم ترمودینامیک ارائه میشود، که بر اساس ممنوع-کردن بعض ی چرخها ست.
بیانها ی کلون-پلانک [1] و کلاؤزیوس [2] شکلهای خاص از این بیان ند.

0 درآمد

چرخه فرایند ی ست که در آن حالتها ی اولیه و نهایی ی سیستم یکسان ند. پس در یک چرخه، تغییر انرژی-ی-درونی ی سیستم صفر است. چرخه ای را بررسی میکنم که در آن سیستم با فقط دُ چشمه گرما مبادله میکند. طی این چرخه، سیستم به اندازه ی W کار میگیرد، و از چشمه ی گرم (H) به اندازه ی Q_H ، و از چشمه ی سرد (C) به اندازه ی Q_C گرما میگیرد. البته هر یک از اینها (گرماها و کار) ممکن است منفی باشند. چون تغییر انرژی-ی-درونی ی سیستم صفر است،

$$0 = Q_H + Q_C + W. \quad (1)$$

پس میشود یک Y از این سه-کمیت را بر حسب D -تای دیگر نوشت. از جمله،

$$Q_H = -(Q_C + W). \quad (2)$$

از نظر تبادل گرما و کار، چرخه با D -تا از این کمیتها مشخص میشود. اینجا با (Q_C, W) کار میکنم. مجموعه Y این دتاییها (بردارها) را با $\mathbb{P}$ نشان میدهم. از نظر تبادل گرما و کار، هر چرخه با یک بردار در صفحه Y مشخص میشود. البته تناظر بین بردارهای $\mathbb{P}$ و سیستمها یک-به-یک نیست: سیستمها بی هستند که یکسان نیستند، اما بردارهای Y شان یکسانند. اما اینجا فقط تبادلهای (Y) کار و گرما را به کار میبرم. به هم بین خاطر چرخه را با بردار مشخص-کننده Y آن یکسان میگیرم: چرخه Y x یعنی چرخه ای که بردار مشخص-کننده Y آن x است. تابعهای Q_C و Q_H و W را چنین تعریف میکنم.

$$x = [Q_C(x), W(x)]. \quad (3)$$

و البته،

$$Q_H(x) = -[Q_C(x) + W(x)]. \quad (4)$$

1 دست-کاری، هندسه

با بردارهای بی در یک فضا- Y -خطی D -بُعدی Y حقیقی ($\mathbb{P}$) کار میکنم. اما خیلی Y از این کارها یا تعریفها به بُعد فضا وابسته نیستند. جاها بی که بُعد مهم است، صریحاً مینویسم. چرخه (سیستم) را میشود مقیاس کرد: α -برابر کرد. در این صورت همه Y کمیتها Y فزونور، از جمله گرماها و کارها، α -برابر میشوند. پس α -برابر-شده Y چرخه Y x ، چرخه Y (αx) است. از جمله چرخه Y $(-x)$ هم آن چرخه Y x است که وارونه شده. D چرخه را میشود با هم جمع کرد. چرخه Y مجموع، متناظر است با سیستم Y که اجتماع سیستمها Y (جدا-از-هم) متناظر با چرخه Y اولیه است.

با ترکیب مقیاس-کردن و جمع کردن، ترکیب-خطی D چرخه تعریف میشود: ترکیب-خطی Y چرخه Y x_1 و x_2 با ضریبها α^1 و α^2 چرخه Y $(\alpha^1 x_1 + \alpha^2 x_2)$ است. span و spri

را چنین تعریف میکنم.

$$\text{span}(x_1, \dots, x_n) = \{\alpha^i x_i \mid \alpha^1, \dots, \alpha^n\}. \quad (5)$$

$$\text{spr}(x_1, \dots, x_n) = \{\alpha^i x_i \mid \alpha^1 \geq 0, \dots, \alpha^n \geq 0\}. \quad (6)$$

$\text{span}(x_1, \dots, x_n)$ را پهنه ی $(x_1, \dots, x_n)$ مینامم. $\text{span}(x)$ یک خطِ گذرنده-از-مبدئ است. $\text{span}(x)$ با یک راستا در $\mathbb{P}$ مشخص میشود.

$\text{spr}(x_1, \dots, x_n)$ را کُنجه ی $(x_1, \dots, x_n)$ مینامم. $\text{spr}(x)$ یک نیمخطِ بسته (با-ابتدا) است، که ابتدا ی ش مبدئ است. $\text{spr}(x)$ با یک جهت در $\mathbb{P}$ مشخص میشود. میگویم مجموعه ی $\mathbb{S}$ بیش-گوژ است، اگر کُنجه ی هر دُ نقطه در $\mathbb{S}$ زیرمجموعه ی $\mathbb{S}$ باشد:

$$(x_1, x_2) \in (\mathbb{S}^2) \Rightarrow [\text{spr}(x_1, x_2)] \subseteq \mathbb{S}. \quad (7)$$

دیده میشود $\text{spr}(x_1, \dots, x_n)$ بیش-گوژ است: کوچکترین مجموعه ی بیش-گوژ ی که x_1 تا x_n را در بر دارد. دیده میشود

$$\text{spr}(x_1, \dots, x_n, -x_1, \dots, -x_n) = \text{span}(x_1, \dots, x_n). \quad (8)$$

پس اگر $\mathbb{S}$ بیش-گوژ باشد، و $\{x_1, \dots, x_n\}$ و $\{-x_1, \dots, -x_n\}$ زیرمجموعه ی $\mathbb{S}$ باشند،

$$[\text{span}(x_1, \dots, x_n)] \subseteq \mathbb{S}. \quad (9)$$

اگر $\{x_1, \dots, x_n\}$ یک زیرمجموعه ی خطی-مستقل فضا-ی خطی ی n -بعدی ی $\mathbb{V}$ باشد،

$$\text{span}(x_1, \dots, x_n) = \mathbb{V}. \quad (10)$$

گیرم چنین است، و $\mathbb{S}$ یک زیرمجموعه ی بیش-گوژ $\mathbb{V}$ است، و $\{x_1, \dots, x_n\}$ و $\{-x_1, \dots, -x_n\}$ زیرمجموعه ی $\mathbb{S}$ اند. در این صورت،

$$\mathbb{S} = \mathbb{V}. \quad (11)$$

گیریم $\{x_1, \dots, x_{n+1}\}$ یک زیرمجموعه $(n+1)$ -عضوی فضای n -خطی n -بعدی $\mathbb{V}$ است، و همه n -عضوی $\{x_1, \dots, x_{n+1}\}$ خطی-مستقلند. در این صورت عددها α^1 تا α^{n+1} هستند که

$$\alpha^i x_i = 0. \quad (12)$$

گیریم α^i ها هم-علامتند. پس برای هر i ،

$$(-x_i) \in [\text{spri}(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_{n+1})]. \quad (13)$$

گیریم $\mathbb{S}$ یک زیرمجموعه $\mathbb{V}$ -بیش-گوژ است، و $\{x_1, \dots, x_{n+1}\}$ زیرمجموعه $\mathbb{S}$ است. پس،

$$[\text{spri}(x_1, \dots, x_n)] \subseteq \mathbb{S}. \quad (14)$$

$$[\text{spri}(-x_1, \dots, -x_n)] \subseteq \mathbb{S}. \quad (15)$$

$\{x_1, \dots, x_n\}$ هم خطی-مستقل است، پس $\mathbb{S}$ هم $\mathbb{V}$ است.

2 شدنی و نشدنی

همه $\mathbb{V}$ -چرخها ممکن (شدنی) نیستند. مجموعه $\mathbb{V}$ -چرخها $\mathbb{A}$ را با $\mathbb{A}$ نشان میدهم. اگر x شدنی باشد، (αx) با α $\mathbb{V}$ -نامنفی هم شدنی است:

$$x \in \mathbb{A} \Rightarrow$$

$$[\text{spri}(x)] \subseteq \mathbb{A}. \quad (16)$$

اگر x_1 تا x_n شدنی باشند، $(x_1 + \dots + x_n)$ هم شدنی است. به این ترتیب، اگر x_1 تا x_n شدنی باشند، همه $\mathbb{V}$ -چرخها $\text{spri}(x_1, \dots, x_n)$ هم شدنی یَند:

$$(x_1, \dots, x_n) \in (\mathbb{A}^n) \Rightarrow$$

$$[\text{spri}(x_1, \dots, x_n)] \subseteq \mathbb{A}. \quad (17)$$

این یعنی $\mathbb{A}$ بیش-گوژ است.

اگر x شدنی باشد و α منفی باشد، ممکن است (αx) نشدنی باشد. میگویم چرخه y (شدنی y) برگشت-پذیر است، اگر $(-x)$ شدنی باشد. دیده میشود چرخه y (شدنی y) برگشت-پذیر است، اگر و تنها اگر همه y چرخه y $\text{span}(x)$ شدنی باشند. کلیتر، همه y چرخه y (شدنی y) x_1 تا x_n برگشت-پذیرند، اگر و تنها اگر همه y چرخه y $\text{span}(x_1, \dots, x_n)$ شدنی باشند.

3 قانون دوم

چرخه y e_1 و e_2 را چنین تعریف میکنم.

$$e_1 = (1, 0). \quad (18)$$

$$e_2 = (0, 1). \quad (19)$$

با e_1 ؛ سیستم از چشمه y سرد گرما میگیرد، این گرما را به چشمه y گرم میدهد، و کار مبادله نمیکند. با e_2 ؛ سیستم کار میگیرد، این کار را به شکل گرما به چشمه y گرم میدهد، و با چشمه y سرد گرما مبادله نمیکند. عملن کار به گرما تبدیل میشود و چشمه y سرد حذف شده.

3.1 همواره-شدنی

با $(-e_1)$ ؛ چشمه y گرم به سیستم گرما میدهد، سیستم هم ان گرما را به چشمه y سرد میدهد، و کار مبادله نمیشود. عملن چشمه y گرم به چشمه y سرد گرما میدهد. $(-e_1)$ شدنی ست:

$$(-e_1) \in \mathbb{A}. \quad (20)$$

با e_2 ؛ سیستم عملن با فقط یک چشمه تماس دارد، کار میگیرد، و این کار را به شکل گرما به چشمه میدهد. e_2 شدنی ست:

$$e_2 \in \mathbb{A}. \quad (21)$$

از (20) و (21) دیده میشود همه ی چرخه‌ها ی $\text{spr}(-e_1, e_2)$ شدنی یند:

$$[\text{spr}(-e_1, e_2)] \subseteq \mathbb{A}. \quad (22)$$

رُشن است که

$$\text{spr}(-e_1, e_2) = \{(q, w) \mid q \leq 0, w \geq 0\}. \quad (23)$$

هر چرخه ای که در آن سیستم کار ندهد و از چشمه ی سرد گرما نگیرد شدنی ست. چنین-چرخه ای همواره شدنی ست: مستقل از این که چشمه‌ها چه باشند شدنی ست.

3.2 گرما-گیر و کار-ده

میگویم چرخه ی x گرما-گیر (یخچال) است، اگر

$$Q_C(x) > 0. \quad (24)$$

میگویم چرخه ی x کار-ده (مُتر) است، اگر

$$W(x) < 0. \quad (25)$$

رُشن است که $\text{spr}(-e_1, e_2)$ شامل هیچ چرخه ی گرما-گیر یا کار-ده ی نیست.

3.3 یک شرط کافی که همه ی چرخه‌ها شدنی باشند

گیرم چرخه ی y ، هم گرما-گیر است و هم کار-ده:

$$Q_C(y) > 0. \quad (26)$$

$$W(y) < 0. \quad (27)$$

دیده میشود

$$y + [Q_C(y)](-e_1) + [-W(y)]e_2 = 0. \quad (28)$$

$\{y, -e_1, e_2\}$ یک مجموعه ی 3-عضوی از فضا ی-خطی ی 2-بُعدی ی $\mathbb{P}$ است، و ضربیها ی y و $(-e_1)$ و e_2 در طرف-راست (28) مثبت نند. پس،

$$\text{spri}(y, -e_1, e_2) = \mathbb{P}. \quad (29)$$

پس اگر y شدنی باشد، همه ی چرخها شدنی یند:

$$y \in \mathbb{A} \Rightarrow$$

$$\mathbb{A} = \mathbb{P}. \quad (30)$$

اگر یک چرخه که هم گرما-گیر و هم کار-ده است شدنی باشد، همه ی چرخها شدنی یند.
گیرم گرما-گیر r و کار-ده m شدنی یند. چرخه ی s در $\text{spri}(r, m)$ را چنان میجویم که s هم گرما-گیر و هم کار-ده باشد:

$$s = \rho r + \mu m. \quad (31)$$

$$\rho \geq 0. \quad (32)$$

$$\mu \geq 0. \quad (33)$$

$$Q_C(s) > 0. \quad (34)$$

$$W(s) < 0. \quad (35)$$

چون r گرما-گیر و m مُتر است،

$$Q_C(r) > 0. \quad (36)$$

$$W(m) < 0. \quad (37)$$

و شرطها بر (ρ, μ) ، علاوه بر (32) و (33)، چنین میشوند.

$$\rho + \frac{Q_C(m)}{Q_C(r)} \mu > 0. \quad (38)$$

$$\mu + \frac{-W(r)}{-W(m)} \rho > 0. \quad (39)$$

برای (ρ, μ) جواب هست، اگر و تنها اگر

$$[Q_C(m), W(r)] \notin \mathbb{B}. \quad (40)$$

$$\mathbb{B} = \{(q, w) \mid q < 0, w > 0, (-q)w \geq [Q_C(r)][-W(m)]\}. \quad (41)$$

اگر برای (ρ, μ) جواب باشد، یک چرخه ی شدنی هست (s) که هم گرما-گیر و هم کار-ده است، پس همه ی چرخه ها شدنی یَند: اگر $[Q_C(m), W(r)]$ در $\mathbb{B}$ نباشد، همه ی چرخه ها شدنی یَند. پس، اگر چرخه ها بی باشند که نشدنی یَند، هیچ یک از اعضا ی $\text{spri}(e_1, -e_2)$ شدنی نیستند، مگر 0:

$$\mathbb{A} \neq \mathbb{P} \Rightarrow$$

$$\mathbb{A} \cap [\text{spri}(e_1, -e_2)] = \{0\}. \quad (42)$$

3.4 اصلها (چیزها یی که میدانیم؟) و پیامدِ شان

یک بیانِ قانونِ دومِ ترمودینامیک این (سه-گزاره) است:

- همه ی چرخه ها ی $\text{spri}(-e_1, e_2)$ شدنی یَند.
- دست-کم یک چرخه هست که نشدنی ست.
- * دست-کم یک چرخه ی شدنی (ی ناصفر) هست، که برگشت-پذیر است.
- از • و ◦ نتیجه میشود هیچ یک از اعضا ی $\text{spri}(e_1, -e_2)$ شدنی نیستند، مگر 0. این، همراه با *
- نتیجه میدهد یک e در $\text{spri}(e_1, e_2)$ هست که در $\text{spri}(e_1)$ نیست و در $\text{spri}(e_2)$ هم نیست و e و $(-e)$ ، هر-دُ شدنی یَند:

$$e \in [\text{spri}(e_1, e_2)]. \quad (43)$$

$$e \notin [\text{spri}(e_1)]. \quad (44)$$

$$e \notin [\text{spri}(e_2)]. \quad (45)$$

$$\{e, -e\} \subseteq \mathbb{A}. \quad (46)$$

از (20) و (21) و (46) نتیجه میشود

$$\mathbb{A} \supseteq [\text{spri}(-e_1, e_2, e, -e)]. \quad (47)$$

البته،

$$e_2 \in [\text{spri}(-e_1, e)]. \quad (48)$$

$$(-e_1) \in [\text{spri}(e_2, -e)]. \quad (49)$$

پس،

$$\text{spri}(-e_1, e_2, e, -e) = \text{spri}(-e_1, e, -e). \quad (50)$$

$$\text{spri}(-e_1, e_2, e, -e) = \text{spri}(e_2, e, -e). \quad (51)$$

گیریم y در $\text{spri}(e_2, e, -e)$ نیست. دیده میشود

$$y = a e_2 + b e. \quad (52)$$

$$a < 0. \quad (53)$$

به این ترتیب،

$$-e_2 = (-a)^{-1} y + a^{-1} b e. \quad (54)$$

پس اگر y در $\mathbb{A}$ باشد، $(-e_2)$ هم در $\mathbb{A}$ است. در این صورت $\mathbb{A}$ شامل $\text{span}(e_2, e)$ میشود، که $\mathbb{P}$ است. این نتیجه میدهد $\mathbb{A}$ برابر $\mathbb{P}$ است، که درست نیست، چون چرخه y نشدنی هم هست. پس همه y چرخه y شدنی در $\text{spri}(e_2, e, -e)$ اند. این، همراه با (47) و (51) نتیجه میدهد

$$\mathbb{A} = \text{spri}(-e_1, e_2, e, -e). \quad (55)$$

و البته،

$$\mathbb{A} = \text{spri}(-e_1, e, -e). \quad (56)$$

$$\mathbb{A} = \text{spri}(e_2, e, -e). \quad (57)$$

4 بیانهای دیگر

از بیانهای معمولتر قانون دوم ترمودینامیک، بیان کلوین-پلانک [1] و بیان کلاؤزیوس [2] است.

4.1 بیان کلوین-پلانک

چرخه ای که از فقط یک چشمه گرما بگیرد و همه ی این گرما را به شکل کار بدهد ممکن نیست. چون در این چرخه (ی نشدنی) سیستم با فقط یک چشمه تبادل گرما دارد، این چشمه را میشود چشمه ی گرم یا سرد گرفت. در حالت اول، بیان کلوین-پلانک [1] این میشود.

$$(-e_2) \notin \mathbb{A}. \quad (58)$$

در حالت دوم، بیان کلوین-پلانک [1] این میشود.

$$(e_1 - e_2) \notin \mathbb{A}. \quad (59)$$

البته، در هر-دو حالت، گزاره های • و * هم ضمنی فرض شده اند.

4.2 بیان کلاؤزیوس

چرخه ای که از چشمه ی سرد گرما بگیرد و همه ی این گرما را به چشمه ی گرم بدهد ممکن نیست. بیان کلاؤزیوس [2] این میشود.

$$e_1 \notin \mathbb{A}. \quad (60)$$

البته گزاره های • و * هم ضمنی فرض شده اند.

4.3 مقایسه

بیان ی از قانون دوم ترمودینامیک که شامل سه-گزاره ی • و ◦ و * است، شکل ی کلی ست، که بیانهای کلوین-پلانک [1] و کلاؤزیوس [2] حالت- خاصها یی از آنند. در همه ی این بیانها دو-گزاره ی • و * مشترکند (فرض شده اند). در بیان کلی، گزاره ی ◦ به گزاره های • و * اضافه میشود. در بیانهای کلوین-پلانک [1] و کلاؤزیوس [2]، گزاره ی ◦ با شکلها یی خاصتر جای-گزین شده.

5 پیامدها

از (55)، هم‌تُرز با آن (56) و (57)، دیده می‌شود مجموعه ی چرخِها ی شدنی یک نیم-صفحه (شامل مرز ش) است. مرز این نیم-صفحه پهنه ی e است. $\text{span}(e)$ یک خط است که از مبدئ می‌گذرد. شیب این خط را با ξ نشان می‌دهم:

$$\xi > 0. \quad (61)$$

$$\text{span}(e) = \{(q, w) \mid \xi q - w = 0\}. \quad (62)$$

و مجموعه ی چرخِها ی شدنی چنین می‌شود.

$$\mathbb{A} = \{(q, w) \mid \xi q - w \leq 0\}. \quad (63)$$

پس چرخه ی x شدنی ست، اگر و تنها اگر

$$\xi Q_C(x) - W(x) \leq 0. \quad (64)$$

که، با توجه به (1)، هم‌تُرز است با این دُ-رابطه ی هم‌تُرز-با-هم.

$$(1 + \xi) Q_C(x) + Q_H(x) \leq 0. \quad (65)$$

$$(1 + \xi) W(x) + \xi Q_H(x) \geq 0. \quad (66)$$

در (64) تا (66)، برابری برقرار است، اگر و تنها اگر x برگشت-پذیر باشد، یعنی در $\text{span}(e)$ باشد. رُشن است که ξ به فقط چشمِها بستگی دارد. ξ ی متناظر با چشمِها ی i (گرم) و j (سرد) را با ξ_{ij} نشان می‌دهم: شرط لازم و کافی برای این که چرخه ی برگشت-پذیر e_{ij} ، که با فقط چشمِها ی i و j تبادل-گرما دارد، شدنی باشد این است.

$$(1 + \xi_{ij}) Q_j(e_{ij}) + Q_i(e_{ij}) = 0. \quad (67)$$

سه چشمه ی i و j و k را در نظر می‌گیریم که i گرمتر از j است و j گرمتر از k است. مشابه با (67)،

$$(1 + \xi_{jk}) Q_k(e_{jk}) + Q_j(e_{jk}) = 0. \quad (68)$$

چرخه ی برگشت- پذیر e_{jk} را به چرخه ی برگشت- پذیر $\tilde{e}_{jk}$ مقیاس میکنم:

$$\tilde{e}_{jk} = -\frac{Q_j(e_{ij})}{Q_j(e_{jk})} e_{jk}. \quad (69)$$

دیده میشود

$$Q_j(\tilde{e}_{jk}) = -Q_j(e_{ij}). \quad (70)$$

$$Q_k(\tilde{e}_{jk}) = -\frac{Q_j(e_{ij})}{Q_j(e_{jk})} Q_k(e_{jk}) \quad (71)$$

اجتماع سیستمها یی که چرخه-ی- برگشت- پذیرها ی e_{ij} و $\tilde{e}_{jk}$ را میپیمایند، یک چرخه ی برگشت- پذیر را میپیماید که با فقط چشمها ی i و j و k تبادل- گرما دارد. گرماها و کار مبادله- شده هم جمع کمیتها ی متناظر با چرخها ی e_{ij} و $\tilde{e}_{jk}$ اند. گرماها ی متناظر با این چرخه را با Ω ، و کار متناظر با این چرخه را با $\mathfrak{W}$ نشان میدهم:

$$\Omega_i = Q_i(e_{ij}). \quad (72)$$

$$\Omega_j = Q_j(e_{ij}) + Q_j(\tilde{e}_{jk}). \quad (73)$$

$$\Omega_k = Q_k(\tilde{e}_{jk}). \quad (74)$$

$$\mathfrak{W} = W(e_{ij}) + W(\tilde{e}_{jk}). \quad (75)$$

از (70) و (73) دیده میشود چرخه ی متناظر با اجتماع، با چشمه ی j گرما مبادله نمیکند. پس این چرخه (e) با فقط چشمها ی i و k تبادل- گرما دارد. در نتیجه، مشابه با (67)،

$$(1 + \xi_{ik}) Q_k(e) + Q_i(e) = 0. \quad (76)$$

به این ترتیب،

$$1 + \xi_{ik} = \frac{Q_i(e_{ij})}{Q_j(e_{ij})} \frac{Q_j(e_{jk})}{Q_k(e_{jk})}. \quad (77)$$

که یعنی،

$$1 + \xi_{ik} = (1 + \xi_{ij}) (1 + \xi_{jk}). \quad (78)$$

یک چشمه ی دلبخاه (چشمه ی استاندارد s) و یک ثابت دلبخاه (T_s) میگیرم، و برای هر چشمه ی i کمیت T_i را چنین تعریف میکنم.

$$T_i = (1 + \xi_{is}) T_s. \quad (79)$$

این را در (78) میگذارم. دیده میشود

$$1 + \xi_{ij} = \frac{T_i}{T_j}. \quad (80)$$

این یعنی برای ξ ی متناظر با چشمه-ی-گرم H و چشمه-ی-سرد C ،

$$1 + \xi = \frac{T_H}{T_C}. \quad (81)$$

به T دما ی مطلق میگویند. T یکتا نیست. اما رُشن است که تا حد یک ثابت ضربی یکتا است: نسبت دُ تابع که هر-دُ دما-ی-مطلق ند، یک ثابت است. ثابت-ضربی ی دلبخاه ی که در T هست، با چشمه-ی-استاندارد s و ثابت-دلبخاه T_s تعیین میشود. البته اثر s و T_s بر T مستقل از هم نیست: در T فقط یک پارامتر آزاد هست.

شرط (64) را برای گرما-گیر r به کار میبرم. $Q_C(r)$ مثبت است: رابطه ی (36). پس (64) نتیجه میدهد $W(r)$ هم مثبت است و

$$\frac{Q_C(r)}{W(r)} \leq \frac{1}{\xi}. \quad (82)$$

نسبت گرما بی که از چشمه ی سرد گرفته میشود به کار ی که به گرما-گیر داده میشود را با ν نشان میدهم و به آن شاخص گرما-گیر میگویم. هر چه این شاخص بزرگتر باشد، گرما-گیر بهتر است. دیده میشود

$$\nu(r) \leq \frac{T_C}{T_H - T_C}. \quad (83)$$

برابری (بهترین گرما-گیر) رخ میدهد، اگر و تنها اگر چرخه برگشت-پذیر باشد.

شرط (66) را برای کار-ده m به کار میبریم. $W(m)$ منفی است: رابطه ی (37). پس (66) نتیجه میدهد $Q_H(m)$ مثبت است و

$$\frac{-W(m)}{Q_H(m)} \leq \frac{\xi}{1+\xi}. \quad (84)$$

نسبت کار ی که از کار-ده گرفته میشود به گرما یی که از چشمه ی گرم گرفته میشود را با η نشان میدهم و به آن بازده کار-ده میگویم. هر چه این شاخص بزرگتر باشد، کار-ده بهتر است. دیده میشود

$$\eta(m) \leq 1 - \frac{T_C}{T_H}. \quad (85)$$

برابری (بهترین کار-ده) رخ میدهد، اگر و تنها اگر چرخه برگشت-پذیر باشد.

6 پانوشتها

[1] Kelvin-Planck

[2] Clausius