مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (23) العدد (10) 2001
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research-Engineering Science Series Vol (23) No (10) 2001

المردود الإكسيرجي والطريقة الجديدة لتقييم جودة أنظمة الطاقة الحرارية

الدكتور موسى المحمد*
الدكتور عدنان عمران*

(قبل للنشر في 2000/7/16)

□ الملخّص □

لاقت الأبحاث الترموديناميكية في مجال استخدام مفهوم الإكسيرجي بالتطبيقات، صعوبات شتى، نظراً لاختلاف الباحثين في تحديد طبيعة الإكسيرجي كمقدار يمكن قياسه، أو كشبه تابع، وعلاقته بالعمل الأعظمي، حيث إن المردود الطاقي لايعطي صورة واضحة عن جودة النظام الترموديناميكي (العملية)، ونوعية تحويل الطاقة مقارنة بالمردود الإكسيرجي، الذي يصف بدقة جودة العملية الترموديناميكية، ونوعية تحويل الطاقة . إن الصعوبات الجمة في تعيين قيمة الإكسيرجي، نظراً للأسباب السابقة، أدت إلى تباطؤ تطبيق مفهوم المردود الإكسيرجي في تقييم أنظمة الطاقة.

يهدف البحث إلى تقديم طريقة جديدة للتحليل الترموديناميكي لمفهوم الإكسيرجي، تثبت أن الإكسيرجي تابع للحالة، مما يسهّل تحديد قيمته في أي لحظة، وفي أي نقطة بالنظام، وفقاً للحالة الترموديناميكية .

انطلاقاً من أن الإكسيرجي تابع للحالة، يمكن تحديد المردود الإكسيرجي للنظام، كتابع لقيم المراديد الإكسيرجية لعناصره، وما ينتج من ذلك ،من تحديد أماكن الضياعات، وطرق التحسين ،والسهولة، والدقة بالحسابات، في حالة التصميم، أو الاستثمار الأمثل .

* مدرس في قسم القوى الميكانيكية-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية -جامعة تشرين -اللاذقية- سورية

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (23) العدد (10) 2001
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research-Engineering Science Series Vol (23) No (10) 2001

The Exergy Efficiency and the New Method To Evaluate the Efficiency of the Heat Energy Systems

Dr. Moussa Al – Mohamad*
Dr. Adnan Omran *

(Accepted 16/7/2000)

ABSTRACT

The research tends to offer a new analysis of the Exergy concept ,which proves that the Exergy follows the termodynamic position of a system ,so that it must be submitted to the termodynamic laws ,and it is treated as the enthalpy ,the inside energy, and the entropy, so it is easy to define its value ,at any time ,at any point in the system without giving any attention to the reverse and ir-riverse process that is current in the system .
By using this new method ,we can define the Exergy efficiency of the termodynamic system due to the Exergy efficiency values of its elements and we can also define the spaces of waste in any element of the system ,so it is easy to improve or change the element .
This method is easy and accurate in calculation in the state of the best design and investment.

***Lecture at Mechanical Power Engineering ,Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Tishreen University ‹Lattakia ,Syria**

مقدّمة:

حتى وقتنا الحاضر ،تعتبر الطريقة المتبعة في تحديد وتقييم الأنظمة الطاقية، هي تعيين المردود الحراري للنظام(للعملية) الذي يمثّل نسبة العمل (الطاقة المفيدة) إلى الطاقة الحرارية المقدمة، وفقاً للعلاقة التالية : $h_t = \frac{l}{q_1}$. من خلال دراسة هذه العلاقة تبين أن الصورة والمخرج يتفقان بالواحدات القياسية الترموديناميكية، ويختلفان بالمعنى الفيزيائي إضافةً إلى ذلك، لا يمكن أن تساوي قيمة هذا المردود الواحد، حتى في العمليات العكوسة المثالية، وبالتالي لايمكن أن يعطي أدنى فكرة عن جودة ونوعية تحويل الطاقة .

إن المؤشر الترموديناميكي الحقيقي الذي يعطينا تفسيراً واضحاً لجودة النظام ونوعية الطاقة، هو المردود الإكسيرجي الذي يمثل نسبة إكسيرجي مخرج النظام إلى إكسيرجي دخل النظام ، وهما متماثلان بالمعنى الفيزيائي، وبالواحدات القياسية ، وقيمة هذا المردود يمكن أن تساوي الواحد في العمليات العكوسة المثالية .

إن جميع الباحثين في علم الترموديناميك حتى وقتنا الحاضر، اتبعوا طريقتين مختلفتين في تفسير مفهوم الإكسيرجي فمنهم من اعتبر الإكسيرجي مقداراً يمكن قياسه كالعمل الأعظمي[1] ، ومنهم من اعتبره شبه تابع [2]؛ لأنه لايمكن قياس قيمته مباشرةً، بسبب الصعوبات الكثيرة المتعلقة بحسابه في العمليات الترموديناميكة المختلفة.
إن الاختلاف هذا في طبيعة الإكسيرجي يعود إلى عدم الربط بينه وبين قوانين الترموديناميك ، كما هو الحال في تحديد طبيعة الأنتالبي، أو الطاقة الداخلية، أو الأنتروبي للنظام الترموديناميكي .

يهدف هذا البحث إلى إيجاد طريقة جديدة، نثبت فيها أن الإكسيرجي تابع للحالة الترموديناميكة للنظام، الأمر الذي يجعله خاضعاً لقوانين الترموديناميك، ويعامله كما الانتالبي والطاقة الداخلية والانتروبي ، مما يبسط، ويسهل تحديد قيمته في أي لحظة، وفي أي نقطة بالنظام، بغض النظر عما يجري في النظام من تحولات عكوسة أو غير عكوسة .

إن العمليات الترموديناميكية التي تجري في الطبيعة هي عمليات غير عكوسة ، وتعتبر اللاعكوسية سبباً لانخفاض جودة العملية الترموديناميكية الناشئة عن انخفاض نوعية الطاقة، وليس بسبب مفاقيد الطاقة ، فمثلاً – إن خنق الوسيط العامل لايغير من محتواه الطاقي (h_1=h_2)، بل تنخفض قيمته الإكسيرجية ، وبالتالي كل ظاهرة غير عكوسة هي سبب لضياع الإكسيرجي .

ففي الطريقة الجديدة للتحليل الإكسيرجي في الأنظمة الترموديناميكة، تتم دراسة كل عنصر بالنظام بشكل مستقل، ومدى تأثير مردود هذا العنصر في مردود النظام بالكامل،بمعنى آخر ،إن المردود الإكسيرجي للنظام البسيط،أو المركب (المكون من أكثر من نظام بسيط) يتعين كتابع لمراديد جميع عناصره، ويتم تقييم جودة كل عنصر من خلال ثلاثة مفاهيم أساسية، هي : مردوده الإكسيرجي ،و حصته من التغذية الإجمالية ، والضياع الإكسيرجي النسبي .

إن الطريقة الجديدة المقترحة تعتمد الإكسيرجي كتابع للحالة، وتستغني عن الطريقة الوحيدة الكلاسيكية(غيو–ستودولا) التي تعتمد على تحصيل تغيرات الانتروبي [3] لجميع العمليات في النظام البسيط، أو المركب، وماتتضمنه من صعوبات بالغة، وأخطاء مركبة تنتج من قراءة قيم الانتروبي وإنشائية مخططاته الترموديناميكية . كما أن الطريقة المقترحة تأخذ بالاعتبار اكسيرجي الدخل والخرج للنظام، أو العنصر، بغض النظر من أين أتى ، وهذا مايجعلها أكثر بساطة وسهولة في التطبيقات العملية.

إن استخدام مفهوم الإكسيرجي في مجال التطبيقات، لاقى رواجاً وانتشاراً أكثر منه في مجال البحوث المتوافقة مع المعادلات الأساسية للترموديناميك ،وبالأخص مع مفهوم العمل الأعظمي الذي يرتبط بالإكسيرجي بعلاقة بالغة الدقة.

كلاوزيوس والعمل الأعظمي:

إن مفهوم الإكسيرجي لـه بدايتـه فـي أعمـال كلاوزيـوس الـذي قـام بإيجـاد مفهـوم العمـل الأعظمـي ، وصـاغ القانون الثـاني للترموديناميك بشكله التحليلي التالي:

$$\oint \frac{dQ}{T} \le 0 \qquad (1)$$

الذي يُظهر ميزان تغيرات أنتروبي النظام (جسم التشغيل) ،الذي يقوم بدورة ترموديناميكية عكوسة أو لاعكوسة، نتيجة أخذ أو إعطاء الحرارة Q . وقد عبّر كلاوزيوس عن المقدار العنصري للحرارة بالرمز التعريفي dQ ، الذي إما أن يكون أكبر من الصفر $dQ > 0$ وإما أصغر من الصفر $dQ < 0$ عند أخذ أو إعطاء الحرارة ، أو يساوي الصفر $dQ = 0$ لنظام معزول (أدياباتي) . وهكذا نجد أن:

$$dQ \le 0 \qquad (2)$$

إن الرمز T في العلاقة (1) والعلاقات اللاحقة، يمثل درجة الحرارة المطلقة للمنبع الحراري العلوي للجسم العامل (العنصر) في النظام الذي يستقبل الحرارة أو يقدمها في اللحظة المعينة. . إن جميع الدورات الحقيقية والمدروسة في البحث تمثل دورة تجري بين مصدرين للحرارة ، علوي درجة حرارته T،وسفلي درجة حرارته T_0 .

إن الرمز T_0 يمثل درجة الحرارة المطلقة للمنبع السفلي الذي يمثله الوسط الخارجي، وهي ثابتة في البحث.

إن الرمز $\oint$ المستخدم من قبل كلاوزيوس في العلاقة (1) والعلاقات اللاحقة، يمثل تكاملاً مغلقاً للدورة العاملة، التي تتألف من مجموعة عمليات ترموديناميكية تسلسلية، يقوم، فيها الجسم العامل انطلاقاً من حالة البدء، ثم يعود بعد تنفيذ العمليات إلى حالة البدء، مشكلاً بذلك دورة مغلقة يمكن ترميزها بالشكل الآتي : $\oint = \int_{0\,1\,2\,0}$

حيث تمثل $0 \to 1 \to 2 \to 0$ العمليات الترموديناميكية التي تشكل الدورة المغلقة .

لقد كتب كلاوزيوس العلاقة (1) بالصيغة التالية: (3) $\oint \frac{dQ}{T} + N = 0$

ويمكن تقسيم المعادلة (3) إلى جزأين: الأول عندما $dQ > 0$، والثاني $dQ < 0$ ، وبالتالي نحصل على:

$$\int_0^{Q} \frac{dQ}{T} - \int_0^{Q_0} \frac{dQ}{T} + N = 0 \qquad (4)$$

حيث إن : Q – كمية الحرارة المقدمة للنظام (الجسم العامل) .

Q_0 – كمية الحرارة المطروحة من النظام إلى الوسط الخارجي .

بما أن درجة حرارة المنبع السفلي $T = T_0 = Const$ نجد من المعادلة (4) ما يلي :

$$\int_0^{Q_0} \frac{dQ}{T} = \frac{Q_0}{T_0}$$

وبالتالي، وبعد التعويض بالمعادلة (4) نحصل على :

$$\int_0^{Q} \frac{dQ}{T} - \frac{Q_0}{T_0} + N = 0 \quad \text{أو} \quad \frac{Q_0}{T_0} = \int_0^{Q} \frac{dQ}{T} + N$$

ومنه :

$$Q_0 = T_0 \int_0^Q \frac{dQ}{T} + T_0 N \qquad (5)$$

وبالاعتماد على القانون الأول للترموديناميك نجد:

$$Q_S = Q - Q_0 \qquad (6) \qquad \text{أو} \qquad W_S = Q - Q_0 \qquad (7)$$

حيث Q_S – كمية الحرارة المفيدة بالدورة.

W_S– العمل المفيد الناتج بالدورة.

بتعويض المعادلة (5) في المعادلة (7)، نحصل على عمل الدورة المغلقة العاملة بين مصدري الحرارة (T) و (T_0) .

$$W_S = Q - T_0 \int_0^Q \frac{dQ}{T} - T_0 N \qquad (8)$$

للدورات العكوسة ذا ت المصدر الحراري الأدنى ذي T_0=Const ،تكون $N=0$ ،وبالتالي نجد عمل الدورة العكوسة :

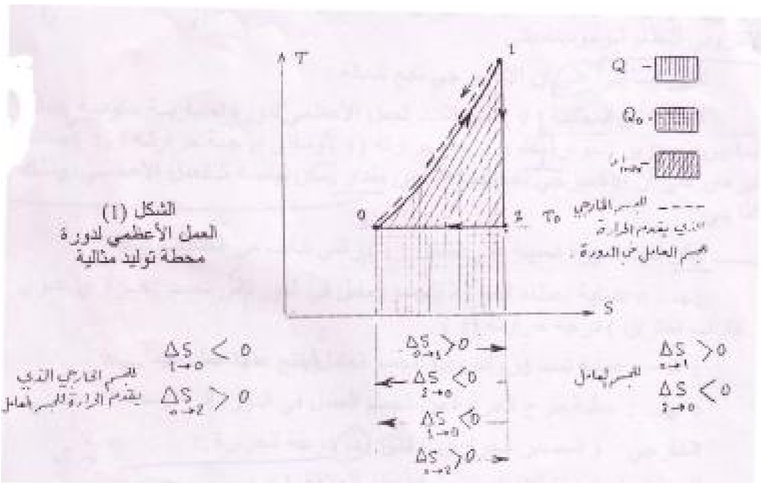
$$W_S = W_{max} = Q - T0 \int_0^Q \frac{dQ}{T} \qquad (9)$$

وفي الحالة التي تكون فيها درجة حرارة المنبع العلوي T = Const ،نحصل على العلاقة التالية :

$$W_{max} = Q\left[1 - \frac{T_0}{T}\right] \qquad (10)$$

إن العلاقة (10) تمثل عمل دورة كارنو المغلقة العكوسة العاملة، فيما بين منبعي الحرارة T وT_0 .

إن عمل دورة كارنو العكوسة يمثل العمل الأعظمي، الذي يمكن الحصول عليه لأي دورة ترموديناميكية مغلقة عكوسة عاملة، فيما بين مصدرين للحرارة؛ علوي درجة حرارته (T)، وسفلي درجة حرارته (T_0). والشكل (1) يمثل دورة مثالية لمحطة توليد تعمل فيما بين مصدري الحرارة؛ العلوي ذي درجة الحرارة المتغيرة (T)، والسفلي ذي درجة الحرارة (T_0) .



بمقارنة المعادلتين (8) و(9)، يتبين أن الحد

> 0 والتي تمثل ازدياد انتروبي النظام الذي ؛

وغير العكوسة هي:

$$dW = T_0 N = T_0 \Delta s_{irr} \quad (12) \qquad \text{أو} \qquad W_{max} - W_s = T_0 N \quad (11)$$

حيث T_0 هي درجة حرارة الوسط المحيط ، Δs_{irr} هو ازدياد أنتروبي النظام خلال الدورة غيرالعكوسة .

إن المعادلة (12) تمثل قانون غيو – ستودولا.

الإكسيرجي تابع للحالة:

إن جميع الباحثين في علم الترموديناميك حتى وقتنا الحاضر استخدموا مفهوم الاكسيرجي كمقدار يمكن قياسه كما العمل الأعظمي وآخرون استخدموه باعتباره شبه تابع نظراً لطبيعة مفهوم الاكسيرجي الذي لايمكن قياس قيمته مباشرةً بسبب الصعوبات الكثيرة المتعلقة بحسابه في العمليات الترموديتاميكية المختلفة.

إن الاختلاف هذا في تحديد طبيعة الاكسيرجي يعود لعدم الربط بين الاكسيرجي وقوانين الترموديناميك كما هو الحال في تحديد طبيعة الأنتالبي أو الطاقة الداخلية أو الانتروبي للنظام الترموديناميكي .

لنبين فيما يلي على أن الإكسيرجي تابع للحالة .

انطلاقاً من المعادلة (9) التي تحدد العمل الأعظمي لدورة اختيارية عكوسة عاملة فيما بين مصدرين للحرارة علوي درجة حرارته (T) وسفلي درجة حرارته (T_0) يمكننا البرهان على أن الاكسيرجي تابع للحالة وليس مقدار يمكن قياسه كالعمل الأعظمي، وذلك كما يلي :

ليكن لدينا الدورة المبينة على الشكل (1) والتي تتألف من العمليات التالية :

$1 \longrightarrow 0$ عملية إعطاء الحرارة للجسم العامل في الدورة من مصدر حراري علوي (غازات احتراق) درجة حرارته (T) .

$2 \longrightarrow 1$ عملية تمدد إيزوأنتروبية للجسم العامل ينتج عنها عمل مفيد W_{max} .

$0 \longrightarrow 2$ عملية طرح الحرارة من الجسم العامل في الدورة إلى الوسط الخارجي (المصدر الحراري الأدنى) ذو درجة الحرارة T_0 .

لنوجد عمل الدورة الأعظمي اعتماداً على العلاقة (9)

$$W_{max} = Q - T_0 \int_0^Q \frac{dQ}{T} = \int_0^Q dQ - T_0 \int_0^Q \frac{dQ}{T} \qquad \textbf{(13)}$$

يمكن أن نكتب المعادلة (13) اعتماداً على الدورة شكل (1) بالصيغة التالية :

$$\oint dw_t = \int_{0-1-2-0} dw_t = \int_0^1 Tds + \int_1^2 Tds + \int_2^0 T_0 ds \qquad \textbf{(a)}$$

لدينا من الشكل (1) للدورة أن :

$$\int_1^2 T\,ds = 0$$

وبالتالي:

$$\oint dW_t = \int_{0-1-2-0} dW_t = \int_0^1 T\,ds + \int_2^0 T_0\,ds \qquad \textbf{(b)}$$

من مخطط الدورة العكوسة شكل (1) لدينا :

$$\int_2^0 T_0\,ds = -\int_0^2 T_0\,ds = -\int_0^1 T_0\,ds$$

وبالتعويض في (**b**) نجد :

$$\oint dW_t = \int_{0-1-2-0} dW_t = \int_0^1 T\,ds - \int_0^1 T_0\,ds = \int_0^1 (T - T_0)\,ds \qquad \textbf{(b1)}$$

لنوجد قيمة $\oint (T - T_0)\,ds$ استناداً إلى الشكل (1) :

$$\oint (T - T_0)\,ds = \int_0^1 (T - T_0)\,ds + \int_1^2 (T - T_0)\,ds + \int_2^0 (T - T_0)\,ds \qquad \textbf{(b2)}$$

لدينا في هذه المعادلة :

للعملية الأديباتية $2 \rightarrow 1$ يكون $ds=0$، وبالتالي : $\int_1^2 (T - T_0)\,ds = 0$

وللعملية الإيزوترمية $0 \rightarrow 2$ لدينا $T=T_0$، وبالتالي : $\int_2^0 (T - T_0)\,ds = 0$

وتصبح العلاقة(**b₂**) على الشكل التالي :

$$\oint (T - T_0)\,ds = \int_0^1 (T - T_0)\,ds \qquad \textbf{(b3)}$$

بمقارنة المعادلة(**b₃**) مع المعادلة(**b₁**) نجد :

$$\oint dW_t = \int_{0-1-2-0} dW_t = \oint (T - T_0)\,ds \qquad \textbf{(c)}$$

وبالتبديل في المعادلة **(C)** نجد :

$$\oint dw_t = \int_{0-1-2-0} dw_t = \oint (1-\frac{T_0}{T})dQ \quad \text{أو} \quad \oint dw_t = \int_{0-1-2-0} dw_t = \oint (T-T_0)\frac{dQ}{T}$$

ومن القانون الثاني للترموديناميك لدينا بدلالة Q المقدمة للدورة 0 – 2 – 1 – 0 ما يلي : $ds = \frac{dQ}{T}$

بمقارنة المعادلة (e) مع المعادلة (13) نستنتج أن :

$$W_{max} = \oint dW_t = \int_{0-1-2-0} dW_t$$

وبتعويض المعادلة(**e**) في المعادلة (13) نجد :

$$W_{max} = Q - T_0\int_0^Q \frac{dQ}{T} = \int_0^Q dQ - T_0\int_0^Q \frac{dQ}{T} = \oint (1-\frac{T_0}{T})dQ \qquad \textbf{(f)}$$

وبناءً على ذلك ،يمكن أن نحدد العمل الأعظمي لدورة عكوسة عاملة، فيما بين مصدرين للحرارة ؛علوي درجة حرارته (T)، وسفلي درجة حرارته (T_0) ،بواسطة المعادلة التالية :

$$W_{max} = \oint_{0-1-2-0} dW = \oint_{rev} dW_t = -\oint_{rev} VdP \qquad \textbf{(14)}$$

وبالتعويض عن قيمة Wmax من المعادلة (14) في المعادلة(f) نجد :

$$-\oint_{0-1-2-0} Vdp = -\oint_{rev} VdP = \oint (1-\frac{T_0}{T})dQ$$

ومنه:

$$[\oint (1-\frac{T0}{T})dQ + \oint Vdp] = 0$$

ويمكن كتابة العلاقة أعلاه بالشكل التالي :

$$\oint \left[(1-\frac{T_0}{T})dQ + VdP\right] = 0 \qquad \textbf{(15)}$$

وبالاعتماد على الخاصة الرياضية التي تقول إن الصيغة التفاضلية الواقعة تحت إشارة التكامل، والتي تساوي الصفر، تمثل تفاضلاً لتابع ما ، ومنه بمفاضلة العلاقة (15) نجد :

$$\left[1-\frac{T_0}{T}\right]dQ+VdP=dE \qquad \textbf{(16)}$$

وهكذا نجد أن المعادلة (16) تمثل تفاضل تابع ما E .

وباستبدال قيمة كل من dQ، Vdp من قانون الترموديناميك الثاني

$dQ = TdS$ **(18)** و $Vdp = dH - TdS$ **(17)**

في المعادلة (16) نجد :

$$\begin{aligned} dE &= (1-\frac{T_0}{T})TdS+dH-TdS \\ &= TdS-T_0dS+dH-TdS \end{aligned}$$

ومنه : $dE = dH - T_0\, dS$ **(19)**

مما تقدم أعلاه نجد أن المعادلة (19) ،هي المعادلة التفاضلية المعرّفة لتابع الحالة E ،لنسمي تابع الحالة هذا بالإكسيرجي

باكتمال المعادلة (19) نجد : $E = H - T_0S + C$ (20)

فمن الشروط الأولية E= 0، عندما $H = H_0$ و $S = S_0$ يمكن تعيين الثابت C ، أي: $C = - H_0 + T_0 S_0$ **(21)**

ومنه نجد قيمة E : $E= (H- T_0S) - (H_0 - T_0S_0)$ **(22)**

لنكامل الآن المعادلة (16) لأي عملية عكوسة حرة ،فنحصل على:

$$\int_{1-2}\left(1-\frac{T_0}{T}\right)dQ = W_{t_{1-2\,rev}}+E_2-E_1 \qquad \textbf{(23)}$$

أو بدلالة العمل الأعظمي نكتب من المعادلة الأخيرة ما يلي :

$$W_{max_{1-2}} = W_{t_{1-2rev}} = \int_{1-2}(1-\frac{T_0}{T})dQ+E_1-E_2 \qquad \textbf{(24)}$$

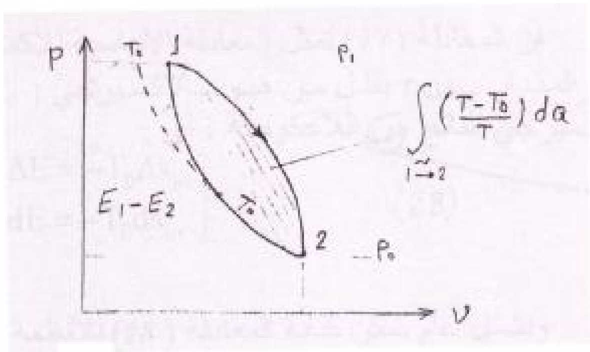
إن المعادلة الأخيرة (24) تبين الرابطة بين عمل الإجراء العكوس ومفهوم الإكسيرجي، والذي يساوي حاصل الجمع الجبري لهبوط الإكسيرجي، فيما بين الحالتين 1 و 2 . وكذلك عندما تكون الحالة النهائية (2) هي حالة التوازن مع الوسط المحيط الخارجي ؛أي $E_2 = 0$ ،فإن العمل الناتج هو عمل أعظمي للإجراء .

أما في الحالة التي يكون فيها التكامل ($\int (1-\frac{T_0}{T})dQ$)مساوياً الصفر، وذلك عندما $dQ = 0$ (أي ds=0) أو $T=T_0$، فإن العمل الأعظمي للإجراء يكون مساوياً E_1 ، أي مساوياً قيمة الإكسيرجي في الحالة الأولية ؛حالة البدء .

أما في الدورات المغلقة التي فيها $E_1 - E_2 = 0$، فإنه يكون لدينا من المعادلة (24) ما يلي :

إن المناقشة أعلاه يوضحها الشكل (2) على مخطط PV .

$$W_{1-2rev} = W_{max} = \int (1 - \frac{T_0}{T}) dQ \qquad \textbf{(25)}$$



الشكل (2)
العمل الأعظمي لإجراء اكسيرجي

وبربط المعادلة **(23)** مع المعادلة **(11)** علماً بأن

$$W_s = W_{t_{rev}} \qquad\qquad W_{max} = W_{t_{rev}}$$

والعلاقة فيما بين العمل العكوس واللاعكوس للإجراء تتحدد بالصيغة التالية :

$$W_{t_{rev}} = W_{t_{irr}} + T_0 \Delta S_{irr}$$

فإنه بعد التعويض عن قيمة $W_{t_{rev}}$ في العلاقة (**23**) ،نحصل على المعادلة التالية :

$$\int_{1-2rev} (1 - \frac{T_0}{T}) dQ = E_2 - E_1 + W_{1-2irr} + T_0 \Delta s_{irr} \qquad \textbf{(26)}$$

أو بالصيغة التالية :

$$W_{t_{1-2irr}} = \int_{1-2} (\frac{T - T_0}{T}) dQ + E_1 - E_2 - T_0 \Delta s_{irr} \qquad \textbf{(27)}$$

إن المعادلة **(27)** تمثل المعادلة الأساسية للإكسيرجي في الإجراءات غير العكوسة. وإن المقدار $T_0 \Delta S_{irr}$ يقلل من هبوط الإكسيرجي ($E_1 - E_2$) ،وهذا المقدار يمثل ضياع الإكسيرجي الناتج من اللاعكوسية ، أي :

$$\left.\begin{aligned} \Delta E &= - T_0 \Delta s_{irr} \\ dE &= - T_0 ds_{irr} \end{aligned}\right\} \qquad \textbf{(28)}$$

وبشكل عام يمكن كتابة المعادلة **(28)** للأنظمة كالتالي: $dE_S \le 0$ **(29)**

حيث إن $dE_S < 0$ للأنظمة الحقيقية ، و$dE_S = 0$ للأنظمة المثالية.

وعند الاشتقاق بالنسبة للزمن نجد أن :

$$\frac{dE_S}{dt} = \dot{E}_S \le 0 \qquad \textbf{(30)}$$

وتبين المعادلة الأخيرة أن إكسيرجي الأنظمة الحقيقية تابع متناقص للزمن؛ لأن جميع الإجراءات الحقيقية في الطبيعة تتصف بازدياد أنتروبي الأنظمة ،التي تحققها وفقاً لقانون الترموديناميك الثاني، أي $S_S \ge 0$

إن خاصية الإكسيرجي هذه هي نتيجة للقرابة الشديدة فيما بين الإكسيرجي والطاقة والانتروبي من جهة، ومفاهيم اللاعكوسية من جهة أخرى . وهكذا فإن المعادلة (30) يمكن اعتبارها صيغة ثانية لقانون الترموديناميك الثاني بمساعدة الإكسيرجي.

المردود الإكسيرجي للنظام كتابع لمراديد عناصره

(الطريقة الجديدة لحساب المردود الإكسيرجي للنظام)

إن الأنظمة الحقيقية المستخدمة في الحياة العملية ،هي _عادةً _أنظمة معقدة ومركبة من عناصر عديدة، يحقق كل منها وظيفته الجزئية بمردود طاقي وإكسيرجي مختلف عن الآخر. إن صفة الصعوبة التي هي سمة مميزة للطريقة الإكسيرجية، تتطلب الصياغة الأكثر بساطة وسهولة والأقل أخطاء، لكي تسمح لهذه الطريقة في المستقبل بأن تجد طريقها إلى التطبيق، ليس فقط في اختبارات الأنظمة التقنية الطاقية الموجودة حالياً ، بل _أيضاً _في تخطيط واقتراح المردود الاكسيرجي للنظام الطاقي التقني البسيط أو المركب ،كتابع لمراديد عناصره، وبالتالي تحديد دور كل عنصر ،وتأثيره في المردود العام للنظام ، وإظهار أمكنة الضياعات، وسبب حصول هذه الضياعات في النظام، وبالتالي في العنصر، وهذا مايسهّل ايجاد الحلول اللازمة أو الممكنة لإدخال التحسينات على النظام أو العنصر.

للبرهان على صحة الطريقة الجديدة المقترحة، نقوم بإدخال صياغة مشتركة للضياعات الداخلية والخارجية للإكسيرجي كما يلي :

$$\dot{E}_{ext} + \dot{E}_{int} = \dot{E}_{Xs} = \sum_{i=1}^{n} \dot{E}_{Xi} \qquad \textbf{(31)}$$

حيث E_{ext}– تدفق الضياعات الخارجية للإكسيرجي.

E_{int}– تدفق الضياعات الداخلية للإكسيرجي.

E_{xS}– تدفق الضياعات الإكسيرجية بالنظام.

E_{xi} _ تدفق ضياع الإكسيرجي للعنصر I .

لنكتب معادلة الموازنة الإكسيرجية للنظام على الشكل الآتي:

$$\dot{E}_{As} - \dot{E}_{Ns} - \dot{E}_{xs} = 0 \qquad \textbf{(32)}$$

حيث EAs – تدفق الإكسيرجي على مدخل النظام.

ENs – تدفق الإكسيرجي المفيدة من النظام.

Exs – تدفق الضياعات الاكسيرجية في النظام.

وبتقسيم معادلة الموازنة **(32)** على E_{As} نحصل على:

$$1 - \frac{\dot{E}_{Ns}}{\dot{E}_{As}} - \frac{\dot{E}_{Xs}}{\dot{E}_{As}} = 0 \qquad \textbf{(33)}$$

لنوجد المردود الإكسيرجي للنظام η_{ES} كنسبة خرج النظام إلى دخله،وباستخدام المعادلات **(33)**،(**31)** :

$$\eta_{Es} = \frac{\dot{E}_{Ns}}{\dot{E}_{As}} = 1 - \frac{\dot{E}_{xs}}{\dot{E}_{As}} = 1 - \frac{\sum \dot{E}_{xi}}{\dot{E}_{As}} \qquad \mathbf{(34)}$$

لنكتب الآن معادلة الموازنة الإكسيرجية لعنصر ما i في النظام، فنجد:

$$\dot{E}_{Ai} - \dot{E}_{Ni} - \dot{E}_{xi} = 0 \qquad \mathbf{(35)}$$

وبتقسيم المعادلة الأخيرة على E_{AS} نحصل على :

$$\frac{\dot{E}_{Ai}}{\dot{E}_{As}} - \frac{\dot{E}_{Ni}}{\dot{E}_{As}} - \frac{\dot{E}_{xi}}{\dot{E}_{As}} = 0 \qquad \mathbf{(36)}$$

ومنه نجد :

$$\frac{\dot{E}_{xi}}{\dot{E}_{As}} = \frac{\dot{E}_{Ai}}{\dot{E}_{As}} - \frac{\dot{E}_{Ni}}{\dot{E}_{As}}$$

وبضرب الحد الثاني من الطرف الثاني للمعادلة الأخيرة بـ $\dot{E}_{Ai}$ وتقسيمه نجد بعد الترتيب:

$$\frac{\dot{E}_{xi}}{\dot{E}_{As}} = \frac{\dot{E}_{Ai}}{\dot{E}_{As}} - \frac{\dot{E}_{Ni}}{\dot{E}_{Ai}} \cdot \frac{\dot{E}_{Ai}}{\dot{E}_{As}} \qquad \mathbf{(37)}$$

بتعويض المعادلة الأخيرة **(37)** في العلاقة **(34)** نجد:

$$\eta_{Es} = 1 - \sum \left[\frac{\dot{E}_{Ai}}{\dot{E}_{As}} - \frac{\dot{E}_{Ni}}{\dot{E}_{Ai}} \cdot \frac{\dot{E}_{Ai}}{\dot{E}_{As}} \right] \qquad \mathbf{(38)}$$

لندخل الرموز التالية :

- $\frac{\dot{E}_{Ai}}{\dot{E}_{As}} = \mu_i$ وهي تمثل نسبة تغذية عنصر ما من إكسيرجي تغذية النظام.
- $\frac{\dot{E}_{Ni}}{\dot{E}_{Ai}} = \eta_{Ei}$ وهي تمثل المردود الإكسيرجي لعنصر ما i في النظام.
- $\frac{E_{xi}}{E_{As}} = \delta_i$ وهي تمثل الضياع الإكسيرجي النسبي لعنصر ما i في النظام.

وبتبديل الرموز نحصل على الصيغة العامة الجديدة التي تحدد المردود الإكسيرجي للنظام، كتابع لمراديد عناصره، وهي

إن الصيغة (39) تسمح بحساب المردود الإكسيرجي للأنظمة التقنية البسيطة، أو المركبة بشكل حر (اختياري) ،وإن

$$\eta_{Es}=1-\sum \mu_i(1-\eta_{Ei}) \quad \text{أو} \quad \eta_{Es}=1-\sum(\mu_i-\eta_{Ei}\mu_i) \qquad \textbf{(39)}$$

$$\text{أو} \quad \eta_{Es}=1-\sum \delta_i$$

حصة إكسيرجي التغذية μ_i لعنصر ما، يمكن أن تأخذ قيماً حرة موجبة أي : $\mu \geq 0$

حيث تظهر القيمة $\mu>1$ عند العنصر الأولي، عندما تدخل تدفقات راجعة (عائدة) إلى جانب التدفق الرئيسي من خارج النظام (وقود) ،والذي يغذي العنصر الأولي . أما قيمة $\mu=1$ فتظهر لأجل عنصر أولي بدون تدفقات إكسيرجية راجعة إليه . أما قيم μ المحصورة فيما بين $0<\mu<1$ تظهر لأجل عناصر تالية للعنصر الأول في النظام المتعدد العناصر .

أما المردود الإكسيرجي لعنصر ما η_{Ei} في النظام، فإنه يأخذ قيماً تتراوح بين $1 \geq \eta_{Ei} \geq 0$ (40)

وبالتالي فإن المردود الإكسيرجي للنظام سيأخذ القيم التالية : $1 \geq \eta_{Es} \geq 0$ (41)

وهكذا نجد أنه لحساب المردود الإكسيرجي للنظام البسيط المؤلف من عناصر عديدة، تلزم فقط معرفة قيمة المردود الإكسيرجي η_{E_i} لكل عنصر من عناصره (المردود المقترح أو المقاس) ، وكذلك حصة إكسيرجي تغذية العنصر ذاته μ_i ويمكن أن يدخل في حساب حصة اكسيرجي التغذية للعنصر I أي إكسيرجي مهدور أو قادم من عنصر سابق.

إن الطريقة الجديدة المقترحة هذه، تمكّن من تقييم كل عنصر بمفرده ،بمساعدة مردوده الإكسيرجي، وبالتالي تقييم تأثيره في المردود الإكسيرجي العام للنظام ، كما تساعد في بناء مخطط الضياعات الإكسيرجية لكامل النظام . وتختلف هذه الطريقة في الجوهر عن الطريقة المعروفة والمستخدمة حالياً ،التي تعتمد على تحصيل تغيرات الانتروبي للنظام ومافيها من الصعوبات لتحصيل ذلك ، إضافة إلى الأخطاء المركبة الناتجة من قراءة المخططات وأخطاء بناء المخططات أصلاً ففي الطريقة الجديدة يتطلب فقط معرفة تدفقات الإكسيرجي على جميع المداخل والمخارج.

إن البساطة والدقة العالية للطريقة والصيغة المقترحة في حساب المردود الإكسيرجي للنظام البسيط، أو المعقد (المؤلف من أكثر من نظام طاقي) يوضحه المثال التالي:

الدراسة التطبيقية لنتائج البحث

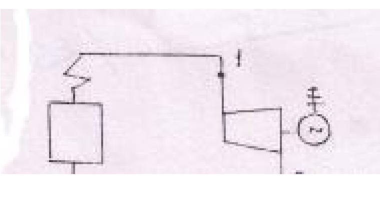
ليكن لدينا أبسط محطة توربينية بخارية تعمل وفق البارامترات التالية $t_1 = 565C$ ، $P_1 = 13$ MPa ، الضغط العامل في المكثف $P_2=0,04at$ ،المردود النسبي الداخلي للعنفة $\eta^T_{0i} = 0,85$ ، وللمضخة $\eta^p_{0i} = 0,87$ مردود المرجل $\eta_b = 0,82$ بارامترات الوسط الخارجي

$t_0 = 20\ C^o$ ، $P_0 = 0,1$ MPa ، $h_0 = 84$ kJ/kg ، $s_0 = 0,296$ kJ/kgK^o

الوقود المستخدم سائل حرارة احتراقه $Q_H = 42$ MJ /kg .

كمية الوقود اللازم حرقها للحصول على 1 kg بخار، هي $m_B = 0.0978$ kg/sec

الحل :



لنوجد بارامترات النقاط الحقيقية للدورة ولنضعها في الجدول التالي أدناه . ولنحسب أيضاً تدفقات الإكسيرجي بالنقاط الرئيسية في الدورة، وفقاً للعلاقة التالية :

$$E = m_v e = m_v [h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0)]$$

حيث m_v – تدفق البخار ، ويساوي 1kg /sec .

النقطة	الانتالبي h $\frac{kJ}{kg}$	الانتروبي s $\frac{kJ}{kgK^{o}}$	الإكسيرجي E $\frac{kJ}{sec}$
1	3511	6.66	1560
2	2232	7.43	65.28
3	121.4	0.4225	0.335
4	136.3	0.4228	15.17

لدينا العمل النوعي للعنفة li=1279 kJ/kg

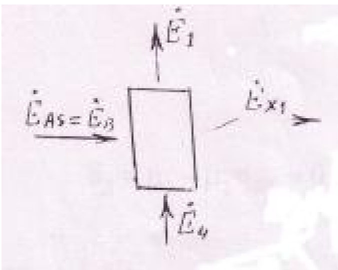
العمل النوعي للمضخة li=14.9 kJ/kg

– يعطى إكسيرجي الوقود السائل بالعلاقة التالية[4] :

$$E_B = 0{,}97\, Q_H\, .m_B =$$

$$= 0.97 * 42000 * 0.0978 = 3984.4 \text{ kW}$$

1– المرجل:



– حصة تغذية المرجل:

$$m_1 = \frac{E_{Ai}}{E_{As}} = \frac{E_B + E_4}{E_B} = \frac{3984{,}4 + 14{,}9}{3984{,}4} = 1{,}0037$$

حيث $E_{Ai} = E_B + E_4$ تمثل تدفق الإكسيرجي الداخل إلى المرجل .

$E_{As} = E_B$ تمثل تدفق الإكسيرجي الداخل إلى المرجل من الخارج (غازات احتراق) .

E_4 تمثل تدفق الإكسيرجي الداخل للمرجل من المضخة (تدفق راجع) .

– المردود الإكسيرجي للمرجل:

$$h_{E1} = \frac{E_1}{E_B + E_4} = \frac{1560}{3984{,}4 + 14{,}9} = 0{,}39$$

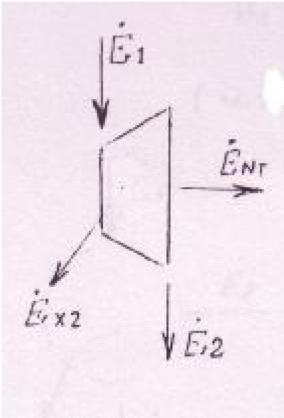
حيث E1 – تمثل تدفق الإكسيرجي على مخرج المرجل .

– الضياع الإكسيرجي النسبي بالمرجل:

$$d_1 = m_1 - m_1 h_{E1} =$$
$$= 1.0037 - 1.0037 * 0.39 = 0.612$$

2- العنفة:

- <u>حصة تغذية العنفة:</u>



$$m_2 = \frac{E_{A2}}{E_{As}} = \frac{E_1}{E_B} = \frac{1560}{3984.4} = 0,392$$

حيث E_{A2} – تمثل تدفق الإكسيرجي على مدخل العنفة .

- **<u>المردود الإكسيرجي للعنفة:</u>**

$$h_{E2} = \frac{E_2 + E_{NT}}{E_1} = \frac{65,28 + 1279}{1560} = 0,862$$

حيث E_2 تمثل تدفق الإكسيرجي على مخرج العنفة .

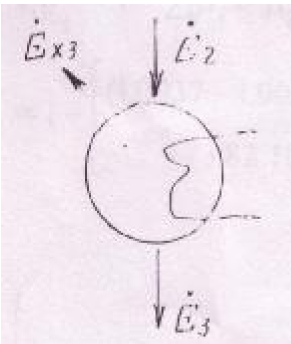
E_{NT} تمثل الإكسيرجي المفيدة من العنفة (الاستطاعة) .

- **<u>الضياع النسبي الإكسيرجي بالعنفة:</u>**

$$d_2 = m_2 - m_2 h_{E2} = 0.392 - 0.392 * 0.862 = 0,054$$

3- المكثف :

- <u>حصة تغذية المكثف:</u>



$$m_3 = \frac{E_{A3}}{E_{As}} = \frac{E_2}{E_B} = \frac{65.28}{3984.4} = 0.0164$$

حيث E_{A3} – تمثل تدفق الإكسيرجي على مدخل المكثف .

- <u>المردود الإكسيرجي للمكثف:</u>

$$m_{E3} = \frac{E_3}{E_2} = \frac{0,3355}{65,28} = 5,14.10^{-3}$$

حيث E_3 – تمثل تدفق الإكسيرجي على مخرج المكثف .

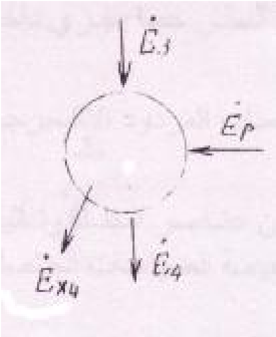
- <u>الضياع النسبي الإكسيرجي في المكثف :</u>

$$d_3 = m_3 - m_3 h_{E3} = 0,0164 - 0.164 * 5.14 * 10^{-3} = 0.0163$$

4- المضخة:

- <u>حصة تغذية المضخة :</u>

$$m_4 = \frac{E_3 + E_P}{E_B} = \frac{0,335 + 14,9}{3984,4} = 3,824 * 10^{-3}$$



حيث Ep – تدفق الإكسيرجي المقدم لتشغيل مضخة (الاستطاعة) .

<u>– المردود الإكسيرجي للمضخة :</u>

$$\eta_{E4} = \frac{E_4}{E_3 + E_p} = \frac{15.17}{0.335 + 14.9} = 0.99$$

حيث E_4 – تدفق الإكسيرجي على مخرج المضخة .

<u>–الضياع النسبي الإكسيرجي في المضخة:</u>

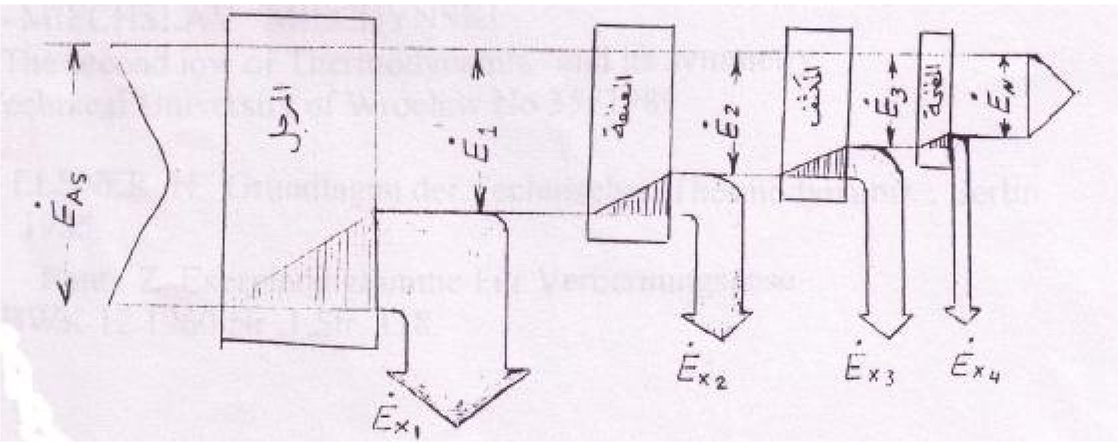
$$\delta_4 = \mu_4 - \mu_4 \eta_{E4} = 3.824*10^{-3} - 3.824*10^{-3}*0.99 = 1{,}63*10^{-5}$$

ومنه المردود الإكسيرجي العام للمحطة كتابع لمراديد عناصرها، يساوي الـ :

$$\eta_{E_s} = 1 - \sum_{1}^{n} \mu_i - \mu_i \eta_{Ei}$$

$$= 1 - \begin{bmatrix} (1{,}0037 - 1{,}0037.0{,}39) + (0{,}39 - 0{,}39.0{,}862) + (0{,}0164 - 0{,}0164.5{,}14.10^{-3}) + \\ + (3{,}82.10^{-3} - 3{,}82.10^{-3}.0{,}99) \end{bmatrix} = 0{,}317$$

لنرسم الآن مخطط الضياعات الإكسيرجية بالنظام بالكامل.



نتائج البحث (الاستنتاجات):

1– الإكسيرجي تابع للحالة الترموديناميكية كما الانتالبي والانتروبي والطاقة الداخلية ، وبالتالي يمكن تحديد قيمته في أي لحظة، وفي أي نقطة، بغض النظر عما يجري داخل النظام.

2– باعتبار الإكسيرجي تابعاً للحالة الترموديناميكية، يمكن حساب المردود الإكسيرجي للنظام كتابع لمراديد جميع عناصره.

3– تمكّن الطريقة المقترحة من تقييم مردود أي عنصر من عناصر النظام ،وتأثيره في المردود الإكسيرجي العام للنظام، وبالتالي تمكّن من تحديد طبيعة الضياعات الحاصلة، وإمكانية تعديلها، أو تخفيضها.

4– تتصف الطريقة المقترحة بالبساطة والسهولة، والدقة في التطبيقات العملية.

المراجع

....

1_ FRATZSCHER . W . BRODJANSKI . V . M . MICHALEK . Exergie . Leipzig . 1986.
2_ MIECHSLAV . MIECHYNSKI
The second low of Thermodynamic and its symmetry
Technical University of Wroclaw No 35 . 1989 .
3_ ELSNER . N . Grundlagen der Technischen Thermodynamic . Berlin 1985 .
4_ Rant . Z . Exergiediagramme fur Verbernungsgase BWK 12 . 1960 Nr ,1
Str ,118 .