تقييم أداء محطة لتحلية المياه بتقنية التناضح العكسي من منظور الإكسيرجي

جمعة امحمد الفلاح

قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية–كلية الهندسة–جامعة الفاتح

E-Mail: gfellah@hotmail.com

ABSTRACT

The scope of the present paper is to perform a thermodynamic analysis for a reverse osmosis desalination plant, in order for physical and chemical exergy to be calculated at all plant states. The analysis shows that the amount of the chemical exergy is very small compared with the physical exergy. It is found that 74.07% (122.77 kW) of the plant incoming exergy is destroyed in the membrane, the two throttling valves and all other components destroy 12.73% (21.10 kW) and 8.92% (14.78 kW) of the incoming exergy, respectively. The total amount of exergy which is destroyed at all plant's component is 158.65 kW of the 165.75 kW incoming exergy, and hence the plant effectiveness is found to be 4.2821%. The plant effectiveness could be raised to 4.8642% and an amount of 173,773 kW. hr per year of the electrical exergy could be saved, if a hydraulic turbine were implemented to save 94% of the destroyed exergy at the two throttling valves.

الملخص

تهدف هذه الورقة إلى إجراء تحليل ديناميكي حراري لمحطة تحلية مياه بالتناضح العكسي، حيث تم حساب الإكسيرجي الطبيعية والكيميائية عند جميع نقاط المحطة. بيّن التحليل أن مقدار الإكسيرجي الكيميائية صغيرة جداً مقارنة بالإكسيرجي الطبيعية، وبحساب اللاإنعكاسية الناتجة في جميع عناصر المحطة، وُجد أن الغشاء يسهم بتحطيم 122.77 كيلووات أي بنسبة 74.07% من الإكسيرجي الداخلة للمحطة عن طريق المضخات، وأن صمامي الخنق يسهما بتحطيم 21.10 كيلووات أي بنسبة 12.73% من الإكسيرجي الداخلة، أما بقية العناصر فتسهم بتحطيم 14.78 كيلووات من الإكسيرجي أي بنسبة 8.92% من الإكسيرجي الداخلة، بذلك تكون محصلة الإكسيرجي المُحطمة في جميع عناصر المحطة 158.65 كيلووات من الإكسيرجي الداخلة البالغة 165.75 كيلووات، وبلغت فاعلية المحطة 4.2821%. باستخدام تربينة هيدروليكية لغرض استرجاع 94% من الاكسيرجي المُحطمة في صمامي الخنق، تم تحسين الفاعلية لتصبح 4.8642%، بذلك يمكن توفير 173,773 كيلووات–ساعة من الطاقة الكهربائية سنوياً.

الكلمات المفتاحية: الإكسيرجي؛ التحلية؛ التناضح العكسي؛ الإنتروبي؛ اللاإنعكاسية.

المقدمة

لاشك في أن كمية المياه الصالحة للشرب والمتوفرة في أرجاء المعمورة تزيد بكثير عن كمية المياه المستخدمة، إلا أن مصادر هذه المياه غير موزعة بشكل متوازن، الأمر الذي سبب في عدم توفر المياه الصالحة للشرب لما يزيد عن ثلاثة أرباع سكان الأرض [1]. سوف تزداد مشاكل الحصول على المياه الصالحة للشرب خصوصاً في البلدان التي تقل فيها معدلات تساقط مياه الأمطار مثل منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، وذلك بسبب زيادة عدد السكان ونضوب المياه العميقة والسطحية مع زيادة الأنشطة الصناعية والزراعية.

بالرغم من أن تحلية المياه الجوفية العسرة معروفة منذ القدم، إلا أن تقنيات التحلية تطورت كثيراً في السنوات الأخيرة، ومن أهم هذه التقنيات، التناضح العكسي (Reverse Osmosis, RO) والتبخير متعدد التأثيرات (Multi-effect Distillation, MED) والتبخير الوميضي متعدد المراحل (Multistage Flash Distillation, MSF).

تنتشر حالياً في أنحاء العالم ما يقارب من 12500 محطة تحلية بسعة تفوق 23 مليون متر مكعب في اليوم، تتواجد أغلبها في المملكة العربية السعودية بسعة إجمالية تبلغ 25% من الإنتاج العالمي، بينما تأتي الولايات المتحدة الأمريكية في المرتبة الثانية حيث تبلغ إنتاجيتها 10% من الإنتاج العالمي، وتستخدم 90% من هذه المحطات تقنيتي التبخير الوميضي متعدد المراحل والتناضح العكسي [2].

تم إستخدام مفهوم الإكسيرجي في التحليل الديناميكي الحراري لعدد من محطات التحلية، حيث قام يونس سيركي [2] بتحليل محطة تحلية بالتناضح العكسي في كاليفورنيا، وقام فالح السليمان وباسل إسماعيل [3] بتقييم محطات التحلية الرئيسية المستخدمة لتقنية التبخير الوميضي متعدد المراحل في المملكة العربية السعودية، بينما قام ف. ن. سليسارينكو [4] بتحليل ديناميكي حراري لمنظومات التحلية المستخدمة لتقنية الغشاء الرقيق، أما م. درويش [5] فقام بالتحليل الديناميكي الحراري لمنظومة تحلية بإستخدام ضغط البخار.

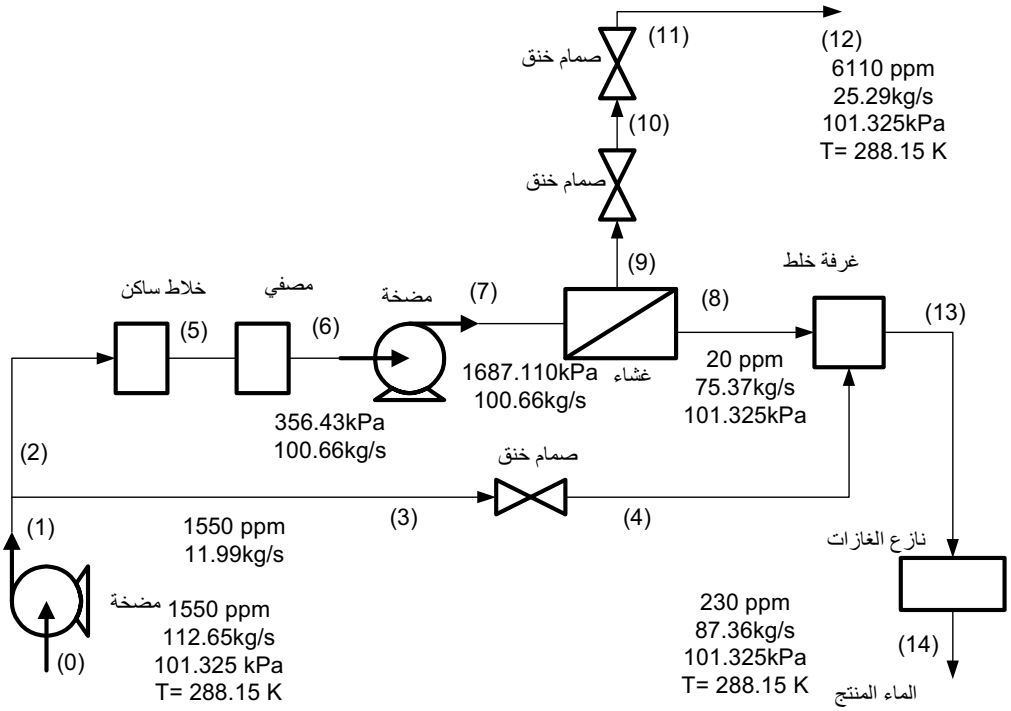
الهدف من العمل

سنقوم في هذه الورقة باستخدام مفهوم الإكسيرجي في تعيين أداء محطة لتحلية المياه العسرة باستخدام تقنية التناضح العكسي، آخذين في الإعتبار الإكسيرجي الطبيعية والكيميائية، وقد تم إستخدام نفس البيانات التشغيلية (data) لمحطة التحلية المقامة في كاليفورنيا [2]، إلا أنه في هذه الورقة تم تصحيح الخطأ الذي وقع فيه سيركي بحسابه لقيم سالبة للإكسيرجي في بعض

نقاط المحطة، وأيضاً تم تعديل النموذج الرياضي المستخدم لنتمكن من حساب الإكسيرجي الطبيعية والكيميائية كُلاً على حدة، ومن ثم حساب الإكسيرجي الكلية، وتوضيح أن مساهمة الإكسيرجي الكيميائية ضئيلة جداً مقارنة بالإكسيرجي الطبيعية وهو المفهوم المتعارف عليه، بذلك تكون للإكسيرجي الكلية قيم منخفضة عند النقاط التي يكون ضغطها ودرجة حرارتها مساويان للضغط الجوي ودرجة حرارة المحيط.

وصف المحطة المختارة

يوضح الشكل (1) رسماً تخطيطياً لمحطة التحلية التي تم أختيارها كوسيلة لتوضيح كيفية إجراء التحليل الديناميكي–الحراري لمحطات التحلية العاملة بتقنية التناضح العكسي. يتم أولا سحب مياه الأبار العسرة باستخدام مضخات الضغط المنخفض، وعند خروج الماء العسر يتم تقسيمه إلى قسمين يتجه أحدهما إلى غرفة الخلط عن طريق صمام خنق، ويتجه القسم الآخر إلى الخلاط الساكن،



الشكل 1: رسما تخطيطيا لمحطة تحلية المياه بتقنية التناضح العكسي

حيث تتم إضافة بعض المواد إلى الماء العسر مثل حمض الهيدروليك ومواد أخرى تمنع الترسبات لحماية الغشاء الأسموزي والعناصر الأخرى، يُزوّد الخلاط الساكن بزعانف تزيد من

الحركة الدوامية للماء حتى لا تكون هناك حاجة لتزويد الخلاط بشغل خارجي لإتمام عملية الخلط، يتم بعد ذلك نزع المواد العالقة في الماء عن طريق المصفي، ثم يدخل الماء إلى المضخة لزيادة ضغطه إلى قيمة كافية للتغلب على الضغط الأسموزي وعلى الإحتكاك الناتج من التدفق داخل الغشاء. يُفصل المحلول الداخل إلى الغشاء إلى تيار ماء عذب يتوجه إلى غرفة الخلط حيث يتم الحصول على الماء بنسبة ملوحة منخفضة نسبيا، ليدخل بعد ذلك إلى نازع الغازات للتخلص من الغازات الذائبة مثل ثاني أكسيدالكربون وكبريتيدالهيدروجين، أما التيار الآخر شديد الملوحة فيتم خفض ضغطه عن طريق صمامي خنق ثم يتم التخلص منه إلى المحيط الخارجي.

التحليل الديناميكي الحراري

تكمن أهمية الإكسيرجي في جمعها للقانونين الأول والثاني للديناميكا الحرارية وفي تعاملها مع الطاقة على أساس الكيف (الجودة) وليس الكم (المقدار) ولتعينها مقدار مساهمة كل عنصر من عناصر المحطة في تحطيم جودة الطاقة. تهدف هذه الورقة إلى وضع نموذج مبسط لتحليل محطات التحلية بالتناضح العكسي باستخدام مفهوم الإكسيرجي، حيث سنقوم بحساب الإكسيرجي الكلية عند جميع نقاط المحطة، وتعيين قيم الإكسيرجي الطبيعية والكيميائية، ثم إيجاد اللاإنعكاسية في كل عنصر من عناصر المحطة، وأيضا حساب كفاءة القانون الثاني (الفاعلية).

يتطلب حساب الإكسيرجي الطبيعية تحديد الحالة الميتة المقيدة (restricted dead state) وهي:

$$P_0 = 101.325\text{kPa}, T_0 = 288.15\ \text{K}$$

ويتطلب حساب الإكسيرجي الكيميائية تحديد الحالة الميتة المحيطية (environmental dead state) وهي:

$$P_0 = 101.325\text{kPa}, T_0 = 288.15\text{K}, 1550\ \text{ppm}$$

تسلك المحاليل سلوك المحاليل المثالية إذا كان كسر الكتلة للمادة المذابة لا يزيد عن 5% [2]، وبذلك يمكن اعتبار أن المحلول قيد الدراسة يسلك سلوك المحاليل المثالية إذ أن كسر الملح فيه لا يتجاوز 0.611%.

كسر الكتلة (mass fraction- mf) والكسر المولي (mole fraction-x):

يعتبر المحلول لدينا مخلوط من الماء النقي وملح كلوريد الصوديوم، حيث تعمل محطة التحلية على فصل الملح من الماء العسر الداخل اليها وذلك للحصول على ماء منتج بملوحة منخفضة نسبيا ليصبح صالحا للشرب، فإذا كانت كتلة المخلوط m، عندها يكون:

$$m = m_w + m_s \qquad (1)$$

حيث m_w كتلة الماء و m_s كتلة الملح في المحلول، وبالقسمة على كتلة المحلول، نحصل على:

$$1 = mf_w + mf_s \quad (2)$$

حيث:

mf_w: كسر الكتلة للماء و mf_s: كسر الكتلة للملح.

بفرض أن N تمثل عدد مولات المحلول و N_w و N_s عدد مولات الماء والملح على التوالي في المحلول عندها:

$$N = N_w + N_s \quad (3)$$

وبالقسمة على عدد مولات المحلول نحصل على:

$$1 = x_w + x_s \quad (4)$$

حيث x_w و x_s يمثلان الكسر المولي للماء والملح على التوالي. يمكن الحصول على كسر الكتلة للماء (mf_w) وللملح (mf_s) كالآتي:

$$mf_w = m_w/m = (N_w \times M_w)/(N \times M) = x_w M_w/M \quad (5)$$

$$mf_s = m_s/m = (N_s \times M_s)/(N \times M) = x_s M_s/M \quad (6)$$

بذلك يمكن الحصول على الوزن الجزيئي للمحلول (M) كالآتي:

$$M = \frac{m}{N} = (N_s \times M_s + N_w \times M_w)/N = x_s M_s + x_w M_w \quad (7)$$

حيث M_w و M_s الوزن الجزيئي للماء والملح على التوالي. يمكن ربط الكسر المولي وكسر الكتلة لكل من الملح والماء كالآتي:

$$x_s = \frac{M_w}{M_s(1/mf_s - 1) + M_w} \quad (8)$$

$$x_w = \frac{M_s}{M_w(1/mf_w - 1) + M_s} \quad (9)$$

يمكن التعبير عن ملوحة مخلوط بـ ppm (particles per million) التي ترتبط مع كسر الكتلة بالعلاقة:

$$ppm = mf_s \times 10^6 \quad (10)$$

يوضح الجدول (1) معدلات التدفق والضغوط والملوحة وأيضاً كسر الكتلة عند جميع نقاط المحطة.

الجدول 1: خواص ومعدلات التدفق عند جميع نقاط المحطة

mfw	mfs	الملوحة (ppm)	الضغط (kPa)	التدفق	الحالة
0.9985	0.0016	1550	101.325	112.65	0
0.9985	0.0016	1550	384.01	112.65	1
0.9985	0.0016	1550	384.01	100.66	2
0.9985	0.0016	1550	384.01	11.99	3
0.9985	0.0016	1550	101.325	11.99	4
0.9985	0.0016	1550	370.22	100.66	5
0.9985	0.0016	1550	356.43	100.66	6
0.9985	0.0016	1550	1687.11	100.66	7
1.0000	0.0000	20	101.325	75.37	8
0.9939	0.0061	6110	1225.17	25.29	9
0.9939	0.0061	6110	652.9	25.29	10
0.9939	0.0061	6110	390.51	25.29	11
0.9939	0.0061	6110	101.325	25.29	12
0.9998	0.0002	230	101.325	87.36	13
0.9998	0.0002	230	101.325	87.36	14

بينما يوضح الجدول (2) الكسر المولي وعدد المولات والأوزان الجزيئية عند جميع نقاط المحطة. يلاحظ هنا أن كسر الكتلة للماء يكاد يبلغ 100%، بذلك يمكن فرض قيمة ثابتة للحجم النوعي للمحلول $\left(v = .001 \frac{m^3}{kg} \right)$.

الجدول 2: الكسر المولي وعدد المولات المتدفقة والوزن الجزيئي

M	kmol/sec	xw	xs	الحالة
18.0193	6.2516	0.9995	0.0005	0
18.0193	6.2516	0.9995	0.0005	1
18.0193	5.5862	0.9995	0.0005	2
18.0193	0.6654	0.9995	0.0005	3
18.0193	0.6654	0.9995	0.0005	4
18.0193	5.5862	0.9995	0.0005	5
18.0193	5.5862	0.9995	0.0005	6
18.0193	5.5862	0.9995	0.0005	7
18.0002	4.1872	1.0000	0.0000	8
18.0761	1.3991	0.9981	0.0019	9
18.0761	1.3991	0.9981	0.0019	10
18.0761	1.3991	0.9981	0.0019	11
18.0761	1.3991	0.9981	0.0019	12
18.0029	4.8526	0.9999	0.0001	13
18.0029	4.8526	0.9999	0.0001	14

الإكسيرجي:

تُحسب الإكسيرجي الكلية Ψ_{total} بالجمع الجبري لكل من الإكسيرجي الفيزيائية $\Psi_{physical}$ والإكسيرجي الكيميائية $\Psi_{chemical}$ كالآتي:

$$\Psi_{total} = \Psi_{physical} + \Psi_{chemical} \qquad (11)$$

حيث يمكن حساب الإكسيرجي الفيزيائية بالمعادلة:

$$\Psi_{physical} = \dot{m}\left[(h - h_0) - T_0(s - s_0)\right] \quad (kW) \qquad (12)$$

حيث:

$h(kJ/kg)$ و $s\left(\frac{kJ}{kg.K}\right)$: يمثلان إنثلبي وأنتروبي المحلول على التوالي،

$h_0(kJ/kg)$ و $s_0\left(\frac{kJ}{kg.K}\right)$: يمثلان إنثلبي وأنتروبي المحلول عند النقطة المرجعية على التوالي. بما أن:

$$Tds = dh - vdp \qquad (13)$$

وبفرض أن درجة الحرارة ثابتة عند جميع نقاط المحطة، وأن التغير في كثافة المحلول صغيره جداً، عندها يمكن تقريب المعادلة (13) لتصبح كالآتي:

$$T_0(s - s_0) = (h - h_0) - v(P - P_0) \qquad (14)$$

حيث $P(kPa)$: يمثل الضغط عند أي نقطة.

وبالتعويض في المعادلة (12)، نحصل على:

$$\Psi_{physical} = \dot{m} \times v(P - P_0) \quad (kW) \qquad (15)$$

يمكن حساب الإكسيرجي الكيميائية للمحلول المثالي من العلاقة [6]:

$$\psi_{chemical} = T_0 \times \dot{m} \times \frac{\overline{R}}{M}\left[\sum x_k \ln\left(\frac{x_k}{x_{k0}}\right)\right] \quad (kW) \qquad (16)$$

حيث:

$\overline{R} = 8.3145 \frac{kJ}{kmol.K}$: الثابت العام للغازات. x_k: الكسر المولي للمركب k في المحلول.

x_{k0} الكسر المولي للمركب k في المحلول المرجعي (عند 1550ppm).

إستخدم سيركي المعادلة التالية لحساب أنتروبي مائع التشغيل عند النقطة المرجعية:

$$s_0 = mf_w s_{w0} + mf_s s_{s0} - \frac{\overline{R}}{M}(x_{w0}\ln(x_{w0}) + x_{s0}\ln(x_{s0})) \quad \left(\frac{kJ}{kg.K}\right) \qquad (17a)$$

إلا أن الصورة الصحيحة للمعادلة كانت يجب أن تكون كالتالي:

$$s_0 = mf_w s_{w0} + mf_s s_{s0} - \frac{\overline{R}}{M}(x_w \ln(x_{w0}) + x_s \ln(x_{s0})) \quad \left(\frac{kJ}{kg.K}\right) \qquad (17b)$$

أدى هذا الخطأ إلى حساب قيم سالبة للإكسيرجي في بعض نقاط المحطة، إلا أن المؤلف برر القيم السالبة بسبب التركيز الملحي الكبيرة عند هذه النقاط وإنه يجب بدل شغل لخفض هذا التركيز لقيمة مساوية لتلك في النقطة المرجعية، فإذا علمنا أن قيمة الإكسيرجي الكيميائية عند جميع نقاط المحطة ضئيلة جدا مقارنة بالإكسيرجي الطبيعية، لأدركنا أن الخطأ في الحسابات أدى إلى نتائج خاطئة وإلى تبرير غير صحيح لهذه النتائج، الأمر الذي استوجب التصحيح.

كفاءة القانون الثاني (الفاعلية)

تُعرّف الفاعلية (ε) أو كفاءة القانون الثاني للديناميكا الحرارية كالآتي:

$$\varepsilon = \frac{\sum \Psi_{out}}{\sum \Psi_{in}} \qquad (18)$$

يمكن حساب الفاعلية أيضا من المعادلة:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum I}{\sum \Psi_{in}} \qquad (19)$$

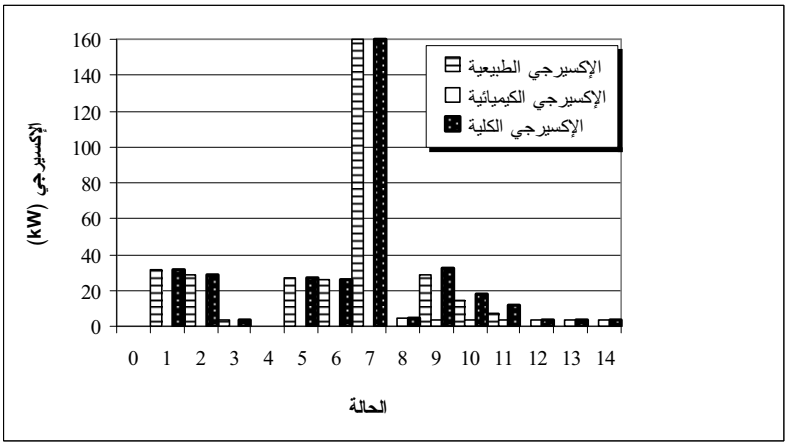
حيث $\sum \Psi_{out}$ تمثل مجموع الإكسيرجي الخارجة، وهي بذلك تمثل الجزء الذي تم استرجاعه من الإكسيرجي المبذولة على المنظومة $\sum \Psi_{in}$، أما $\sum I$ فهي مجموع اللاإنعكاسية الناتجة في جميع عناصر المحطة.

النتائج

يوضح الجدول (3) والشكل (2) قيم الإكسيرجي المتحصل عليها في هذا النموذج عند جميع نقاط المحطة. نلاحظ أن الإكسيرجي الطبيعية تتلاشى عند النقاط التي تكون في حالة إتزان طبيعي مع المحيط، أي النقاط التي تكون عند الضغط الجوي ودرجة حرارة المحيط، بينما تتلاشى الإكسيرجي الكيميائية عند النقاط التي تكون في حالة إتزان محيطي مع المحيط، أي النقاط التي تكون عند ملوحة تساوي 1550 ppm.

الجدول 3: قيم الإكسيرجي عند جميع نقاط المحطة

$\Psi_{total}(kW)$	$\Psi_{ph}(kW)$	$\Psi_{ch}(kW)$	$\psi_{total.}\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	$\psi_{ph.}\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	$\psi_{ch.}\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	الحالة
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
31.8365	31.8365	0.0000	0.2826	0.2826	0.0000	1
28.4480	28.4480	0.0000	0.2826	0.2826	0.0000	2
3.3885	3.3885	0.0000	0.2826	0.2826	0.0000	3
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4
27.0602	27.0602	0.0000	0.2688	0.2688	0.0000	5
25.6724	25.6724	0.0000	0.2550	0.2550	0.0000	6
159.5852	159.5852	0.0000	1.5854	1.5854	0.0000	7
4.4552	0.0000	4.4552	0.0591	0.0000	0.0591	8
32.3593	28.4149	3.9444	1.2795	1.1236	0.1560	9
17.8902	13.9458	3.9444	0.7074	0.5514	0.1560	10
11.2561	7.3117	3.9444	0.4451	0.2891	0.1560	11
3.9444	0.0000	3.9444	0.1560	0.0000	0.1560	12
3.1531	0.0000	3.1531	0.0361	0.0000	0.0361	13
3.1531	0.0000	3.1531	0.0361	0.0000	0.0361	14



الشكل 2: الإكسيرجي عند جميع نقاط المحطة

يمكن أن نلاحظ من الجدول (3) ومن الشكل (2) أن قيم الإكسيرجي الكيميائية صغيرة كالمعتاد عند أغلب النقاط وليس لها تأثير يذكر على التحليل مقارنة بالإكسيرجي الطبيعية.

يوضح الجدول (4) مقارنة نتائج العمل الحالي بحسابات سيركي الذي تضمنت قيم غير صحيحة للإكسيرجي في سبع نقاط وهي النقاط من 8 إلى 14، فالنقطة 8 في حالة اتزان طبيعي مع المحيط، بذلك يجب أن تكون الإكسيرجي عند هذه النقطة أصغر من تلك في النقاط التي ليست في حالة اتزان طبيعي مع المحيط وهي النقاط 1 و 2 و 3 وهذا ما تم التوصل إليه في العمل الحالي. تم أيضا تصحيح نموذج سيركي وذلك بتصحيح المعادلة (17)، وكما نلاحظ في الجدول (4) أن النتائج بعد التصحيح مطابقة لنتائج العمل الحالي.

الجدول 4: مقارنة النتائج بين النموذج الحالي ونموذج سيركي [2]

	النموذج الحالي	نموذج سيركي [2]	نموذج سيركي المصحح
الحالة	$\Psi_{total}(\mathrm{kW})$	$\Psi_{total}(\mathrm{kW})$	$\Psi_{total}(\mathrm{kW})$
0	0.0000	0.0000	0.0000
1	31.8365	31.7951	31.7951
2	28.4480	28.4110	28.4110
3	3.3885	3.3841	3.3841
4	0.0000	0.0000	0.0000
5	27.0602	27.0250	27.0250
6	25.6724	25.6391	25.6391
7	159.5852	159.3777	159.3777
8	4.4552	40.5723	4.4552
9	32.3593	-3.7764	32.1928
10	17.8902	-18.1607	17.8085
11	11.2561	-24.7560	11.2132
12	3.9444	-32.0248	3.9444
13	3.1531	39.2647	3.1531
14	3.1531	39.2647	3.1531

تم تمرير الماء عند النقطة 9 في تربينة هيدروليكية لإسترجاع نسبة 94% من الإكسيرجي لإنتاج شغل ميكانيكي لغرض التقليل من الشغل اللازم لتشغيل المضخات وبالتالي لزيادة كفاءة المحطة [2]، لذلك يجب أن تكون الإكسيرجي عند هذه النقطة موجبة وليست سالبة. لا يوجد أي سبب للحصول على قيم سالبة للإكسيرجي عند النقاط 10 و 11 و 12، فجميع هذه النقاط ليست في حالة اتزان طبيعي مع المحيط وهي عند ضغط أعلى من الضغط الجوي وطبيعي أن تكون الإكسيرجي عند هذه النقاط موجبة، أما النقطتان 13 و 14 فهما في حالة اتزان طبيعي مع المحيط وليس لهما إكسيرجي طبيعية بذلك يجب أن تكون الإكسيرجي عندهما صغيرة لتمثل فقط الإكسيرجي الكيميائية وهذا ما تم الحصول عليه في هذا النموذج.

يمكن حساب الفاعلية من المعادلة (18) كالآتي:

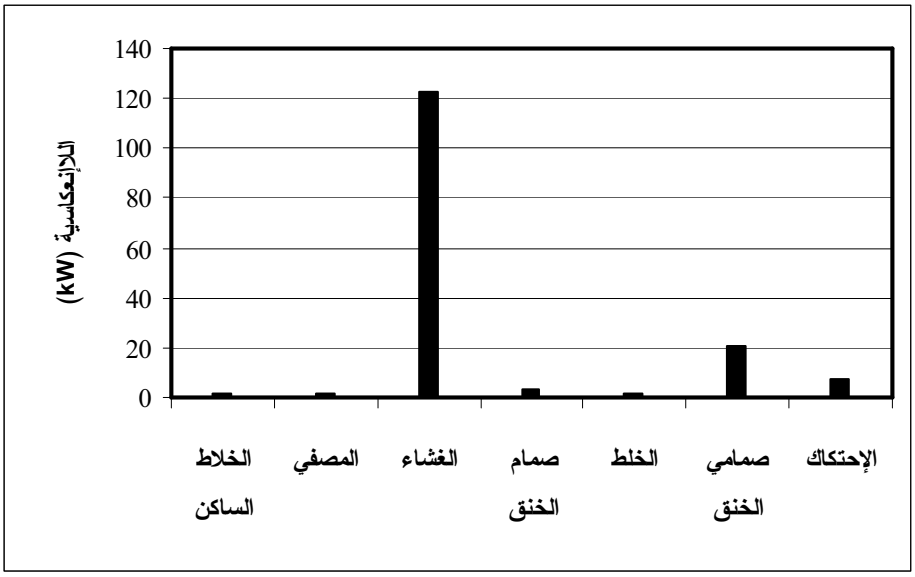
$$\varepsilon = \frac{(3.944 + 3.1531)}{165.75} = 4.2821\%$$

حيث $\Psi_{in} = 165.7493\,\mathrm{kW}$، منها 133.9128 kW لتشغيل المضخة الرئيسية و 31.8365 kW لتشغيل مضخة الضغط المنخفض. يوضح الجدول (5) والشكلين (3) و (4) اللاإنعاكسية المتولّدة ونسبتها المئوية من الإكسيرجي الداخلة للمحطة في كل عنصر من عناصر المحطة، حيث

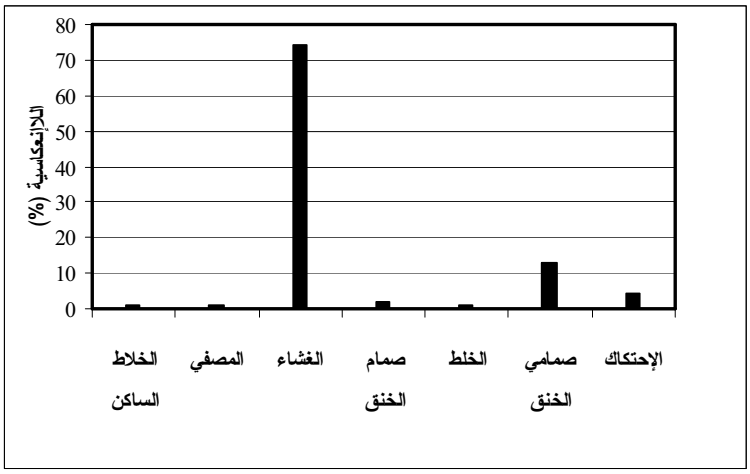
نلاحظ أن قيمة اللاإنعكاسية في الغشاء تساوي 122.7707 kW وهي تمثل 74.07% من الاكسيرجي الداخلة للمحطة، بينما نلاحظ أن قيمة أكبر ثاني اللاإنعكاسية 21.1033 kW وتمثل 12.73% من الإكسيرجي الداخلة تحدث في صمامي الخنق، أما نسبة اللاإنعكاسية في بقية العناصر فتمثل 8.92% من الإكسيرجي الداخلة.

الجدول 5: اللاإنعكاسية الناتجة في جميع عناصر المحطة

	اللاإنعكاسية (kW)	اللاإنعكاسية %
الخلاط الساكن	1.3878	0.84
المصفي	1.3878	0.84
الغشاء	122.7707	74.07
صمام الخنق	3.3885	2.04
الخلط	1.3021	0.79
صمامي الخنق	21.1033	12.73
الاحتكاك	7.3117	4.41

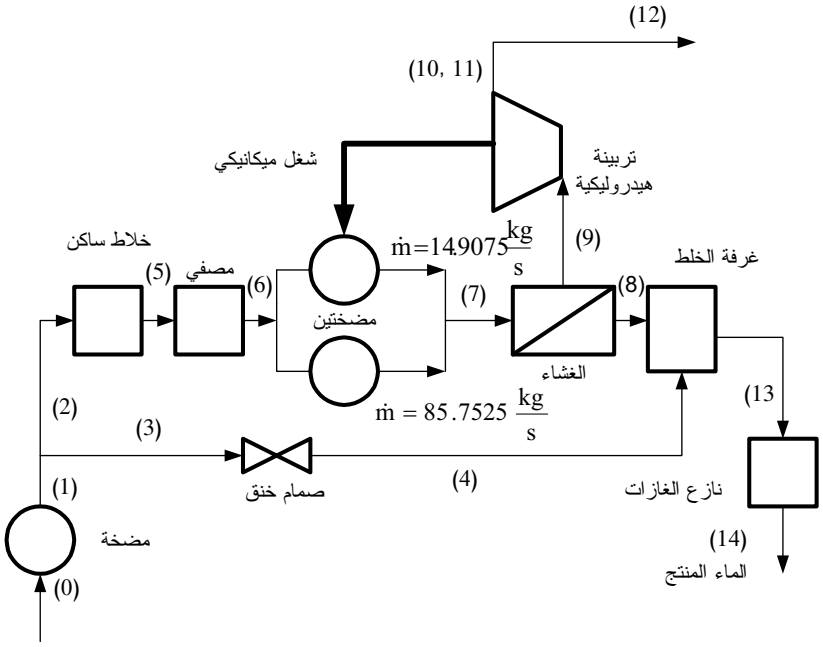


الشكل 3: قيم اللاإنعكاسية الناتجة في جميع عناصر المحطة



الشكل 4: نسبة اللاإنعكاسية في جميع عناصر المحطة

يوضح الشكل (5) نموذج معدّل لمحطة التحلية، وذلك باستخدام تربينة هيدروليكية لإســترجاع 94% من الإكسيرجي المحطمة في صمامي الخنق [2]، أي لإسترجاع 19.8371 kW،



الشكل 5: نموذج مُعدل لإسترداد جزء من الإكسيرجي المحطمة في صمامي الخنق

هذه القدرة (الإكسيرجي) المسترجعة كافية لضخ $14.9075\frac{kg}{s}$ من المحلــول مــن 356.43 kPa (الحالة 6) إلى 1687.11 kPa (الحالة 7)، بذلك تصبح فاعلية المحطة:

$$\varepsilon = \frac{(3.944 + 3.1531)}{(165.75 - 19.837)} = 4.8642\%$$

عندها يمكن توفير مقدار من الطاقة قدره 173772.8016 kW.hr في السنة، فإذا كان سعر الطاقة الكهربائية 50 درهما لكل كيلووات–ساعة، عندها يمكن توفير مبلغ 8688.6401 دينارا سنويا.

الاستنتاج

- بيّنت هذه الورقة بأنه يمكن استخدام مفهوم الاكسيرجي لتقييم محطات التحلية بالتناضح العكسي، حيث يمكن حساب مقدار مساهمة كل عنصر من عناصر المحطة في تحطيم الإكسيرجي، وتبيّن أن اللاإنعكاسية في الغشاء كبيره جداً مقارنة بتلك في بقية مكونات المحطة إلا أنه من منظور الديناميكا الحرارية لا يمكن فعل الكثير للتقليل من هذا الفقد إذ أنه مرتبط ارتباطاً مباشراً بتقنيات تصنيع الغشاء نفسه.
- تم في هذه الورقة أيضا تعديل نموذج سيركي [2]، الذي فشل في حساب قيم مقبولة للإكسيرجي في عدة نقاط من المحطة.
- وُجد أن ثاني أكبر اللاإنعكاسية يحدث في صمامي الخنق، وأنه يمكن تحسين فاعلية المحطة باسترجاع جزء من الإكسيرجي المُحطمة في صمامي الخنق عن طريق استخدام تربينة هيدروليكية.
- تنتشر محطات تحلية المياه في الجماهيرية، خصوصا المحطات التي تستخدم تقنية التبخير الوميضي متعدد المراحل ويمكن تقييم هذه المحطات باستخدام مفهوم الإكسيرجي، حيث تتم مقارنة البيانات التشغيلية بالبيانات التصميمية لمعرفة أداء جميع عناصر المحطة بعد سنوات من التشغيل، وتعيين مدى مساهمة كل عنصر في تحطيم الاكسيرجي، بذلك يساعد التحليل الديناميكي الحراري أصحاب القرار في إتخاذ قرارات الصيانة والتطوير.

المراجع

[1] Technical and economic evaluation of potable water production through desalination of seawater by using nuclear energy and other means. International atomic energy agency, IAEA-TECDOC-666, VIENNA, 1992, ISSN-1011-4289.

[2] Cerci, Y., Exergy analysis of a reverse osmosis desalination plant in California. Desalination, 142, 2002, 257-266.

[3] Faleh, Al-Suliman A., and Basil Ismail, Exergy analysis of major multi-stage flash desalting plants in Saudi Arabia. Desalination, 103, 1995, 265-270.

[4] Slesarenko, V. N., Thermal analysis film desalination systems. Desalination, 139, 2001, 399-404.

[5] Darwish, M. A., Thermal analysis of vapor compression desalination system. Desalination, 69, 1988, 275-295.

[6] Wark, K. Jr., Advanced thermodynamics for engineers. McGraw-hill, Inc., 1995