مقارنة بين جداول فوكالوفيتش والموديل IAPWS-IF97 لبارامترات الماء والبخار

د. م. بسام بدران*

الملخص

الهدف الرئيس من هذه المقارلة هي توضيح الفرق بين جداول فوكالوفيتش المستخدمة في جامعة دمشق– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – بوصفه مرجعاً أساسياً في حساب قيم بارامترات الماء والبخار للادورات البخارية (مثل دورة رانكين) والقيم المستخلصة من المعادلات الناظمة والموضوعة من قبل الجمعية الدولية لمواصفات الماء والبخار**IAPWS-IF97** واعتمادها بوصفها مرجعاً أساسياً في البحث العلمي لحساب بارامترات الماء بأطواره كلّها في الدورات البخارية. قامت الجمعية الدولية لمواصفات الماء والبخار في عام 2012 بنشر آخر نسخة من المعادلات الناظمة لبارامترات الماء والبخار. أعضاء هذه الجمعية الدوليون هم: الولايات المتحدة الأمريكية، كندا، الأرجنتين، البرازيل، إنكلترة، ايرلندا، جمهورية التشك، الدنمارك، فرنسا، ألمانيا، اليونان، إيطاليا، سويسرا (عضو مشارك)، اليابان، روسيا..

الكلمات المفتاحية: جداول فوكالوفيتش، موديل $(IAPWS - IF97)$، الجمعية الدولية لمواصفات الماء والبخار، بارمترات الماء والبخار الترموديناميكية.

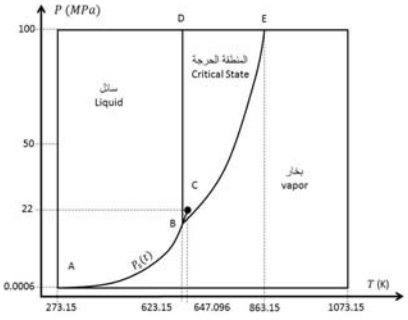
* مدرس في قسم هندسة الميكانيك العام– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق.

1- المقدمة:

الجداول والقيم المتوافرة لـدى جامعـة دمـشق -كليـة الهندسة الميكانيكية والكهربائيـة - لبـارامترات المـاء والبخار (سائل – مزيج سائل بخـار مـشبع – بخـار محمص) تعتمد في أساسها على القيم الموجودة في كتب ملحقة مثل جداول فوكالوفيتش [11] لعـام 1940. أمـا الجداول الموجودة في المراجع والكتب الأجنبية كلّهـا [8,9,10]فهي تعتمـد علـى القـيم المستخلـصة مـن المعادلات الناظمة الموضوعة من قبل الجمعية الدوليـة لمواصـفات المـاء والبخـار بإصـداراتها كلّهـا [1,2,3,4,5,6,7,12]. قامت هذه الدراسـة علـى 1) مقارنة بارامترات الماء والبخار الموجودة في الجـداول المعتمدة لدى جامعة دمشق وبارامترات المـاء والبخـار المعتمدة في الكتب والمراجع الأجنبية والمقالات العلميـة البحثية [1,2, 3, ,4 ,5, 6, 7]و2) تبيان الفرق بينهما (إن وجد)و3) اعتماد القيم الفُضلى لاستخدامها في الدراسات الترموديناميكية المستقبلية وخصوصاً عند استخدام هـذه البارامترات في حساب عمل العنفة البخارية أو الغازيـة أو المشتركة. المقارنة سوف تجري باستخدام الوحـدات الدوليـة (International System SI) أو مايـسمى بالوحدات المترية.

يبين الشكل (1) مناطق أطوار الماء بدلالة الضغط على المحور الشاقولي ودرجة الحرارة على المحور الأفقـي. يمكن تصنيف هذه الأطوار في ثلاث مناطق رئيسة.

• المنطقة الأولى هى منطقة الطور السائل. تقـع هـذه المنطقة على يسار الخط (ABD) كمـا هـو واضـح بالشكل.



الشكل (1) مناطق أطوار الماء والبخار

• المنطقة الثانية هي منطقة الطور الحرج ويحدها الخط (DBE). هذه المنطقة تصف بارامترات البخـار فـوق الحرجة **Super Critical**. في هذه المنطقة نهـتم فقـط ببارامترات الخط (BC).

• المنطقة الثالثة هي منطقة الطور البخاري وتقع علـى يمين الخط (ABE).

تقـاس قـيم الـضغط بالميغاباسـكال وتـتراوح بـين ($0.0006 - 100\ MPa$). تقاس درجة الحرارة بالدرجة كالفن وتتراوح قيمها بين ($0 - 800℃$) أو ($273.15 - 1073.15\ K$).

- الخط (ABD) ينقسم إلى قسمين.القسم الأول هو الخط (AB) الذي يفصل بين الطور السائل والطور البخاري، ويحدد بين القيم ($0 - 350℃$)أو($273.15 - 623.15\ K$).القـسم الثاني هو الخط (BD) الذي يفصل بين الطور الـسائل والطور الحرج وتثبت عنـده درجـة الحـرارة علـى ($623.15\ K$).

- الخط (ABE) أيضاً ينقسم إلى قسمين. القسم الأول هو الخط(AB). أما القسم الثاني فهو الخـط (BE) الـذي يفصل بين الطور الحرج والطور البخاري ويحدد هـذا الخط بين ($350 - 800℃$) أو($623.15 - 1073.15\ K$).

- تعرف النقطة (C) في علوم الترموديناميك بأنها النقطة الحرجة **Critical Point** وتعطى بارامترات هذه النقطـة على الشكل الآتي [1,2,3,4]

$$T_c = 647.096\ K\ (374\ ℃)$$
$$P_c = 22.064\ MPa$$
$$\rho_c = 322\ kg/m^3$$

1. أسس الدارسة:

اعتُمد موديل الجمعية الدولية لمواصفات الماء والبخار $(IAPWS-IF97)$ لاستخراج بارامترات الماء والبخار [4] ومقارنة نتائجها بالقيم الموجودة في الجداول المعتمدة لدى جامعة دمشق [11]. يستخدم الموديل معادلات جيبس للطاقة الحرة Gibbs Energy لتحديد قيم بارامترات الطور السائل والبخاري، ويستخدم أيضاً معادلات هلمهولتس للطاقة الحرة Helmholtz Energy في تحديد قيم بارامترات الطور الحرج.

1.2 منطقة الطور السائل.

استخدمنا المعادلات الرياضية في موديل الجمعية الدولية $(IAPWS-IF97)$ [4] في حساب بارامترات السائل من حجم نوعي وطاقة داخلية وإنتالبي وإنتروبي وحرارة نوعية وتقييمها عند ضغط ثابت ومقارنتها بقيم جداول فوكالوفيتش المتوفرة لدينا.

1.1.2 معادلات بارمترات الوسيط في الطور السائل.

معادلة جيبس للطاقة الحرة (G) في الطور السائل تعطى بدلالة الضغط ودرجة الحرارة في المعادلة (1-2) على الشكل الآتي [4,7]

$$G(P,T) = R*T*\gamma(\pi,\tau) \qquad (1\text{-}2)$$

$$\gamma(\pi,\tau) - \sum_{i=1}^{34} n_i * a_{I_i} * b_{J_i}$$

$$a_{I_i} = (7.1-\pi)^{I_i}$$

$$b_{J_i} = (\tau - 1.222)^{J_i}$$

$$\pi = P/P^*$$

$$\tau = T^*/T$$

إذْ إن

R ثابت الغاز ويساوي $(0.461\,526\ kJ/kg\ K)$

n_i معامل للطور السائل ويعطى في الجدول (1) في الملحق بحسب موديل الجمعية $(IAPWS-IF97)$ [4].

I_i معامل قوة في الطور السائل وتعطى في الجدول (1) في الملحق بحسب موديل الجمعية $(IAPWS-IF97)$ [4].

J_i معامل قوة في الطور السائل وتعطى في الجدول (1) في الملحق بحسب موديل الجمعية $(IAPWS-IF97)$ [4].

P^* ضغط مرجعي $(16.53\ MPa)$

T^* درجة حرارة مرجعية $(1386\ K)$

- الحجم النوعي

$$v = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = \frac{\pi * R * T}{P} * \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \pi}\right)_\tau$$

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \pi}\right)_\tau = \left(\sum_{i=1}^{34} -n_i * I_i * a_{(I_i-1)} * b_{J_i}\right)$$

- الطاقة الداخلية

$$u = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p - P\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T$$

$$= R*T*\left\{\tau\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi - \pi\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \pi}\right)_\tau\right\}$$

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi = \left(\sum_{i=1}^{34} n_i * J_i * a_{(I_i)} * b_{(J_i-1)}\right)$$

- الإنتالبي

$$h = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = R*T*\tau\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi$$

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi = \left(\sum_{i-1}^{34} n_i * J_i * a_{I_i} * b_{(J_i-1)}\right)$$

- الإنتروبي

$$s = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = R*\left[\tau*\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi - \gamma\right]$$

- الحرارة النوعية عند ضغط ثابت

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = -R*\tau^2*\left(\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \tau^2}\right)_\pi$$

$$\left(\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \tau^2}\right) = \left(\sum_{i=1}^{34} n_i * J_i * (J_i - 1) * a_{i_i} * b_{(J_i - 2)}\right)$$

حدود الحساب في الطور السائل.

يعطي موديل الجمعية $(IAPWS - IF97)$ حدود درجة الحرارة والضغط في منطقة السائل كما يأتي:

على الخط (AB)

$$0°C\ (273.15\ K) < T < 350°C\ (623.15\ K)$$
$$0 < P < P_s(t)$$

على الخط (BD)

$$T - 350°C\ (623.15\ K)$$
$$P_s(t) < P < 100\ MPa$$

2.1.2 مقارنة النتائج.

بُرمجت المعادلات ومعاملاتها الموجودة في موديل الجمعية $(IAPWS - IF97)$ باستخدام برنامج **MVBA** للحصول على البارامترات المذكورة سابقاً كلّها، ثم قُورِنَتْ هذه القيم بالقيم الموجودة في جداول فوكالوفيتش المتوافرة لدينا.

- مقارنة القيم على الخط (AB) (خط الإشباع حيث قيم كسر الجفاف **Quality**تساوي الصفر) بدلالة درجة الحرارة فقط. تعطى بارامترات السائل المشبع **Saturated Liquid** الموجودة في جداول فوكالوفيتش بالرمز (y') في حين تعطى البارامترات نفسها في المراجع الأجنبية [8,9,10] التي تعتمد في قيمها على موديل الجمعية الدولية $(IAPWS - IF97)$ بالرمز (y_f)[5]

الجدول (1) نتائج الطور السائل على الخط (AB)

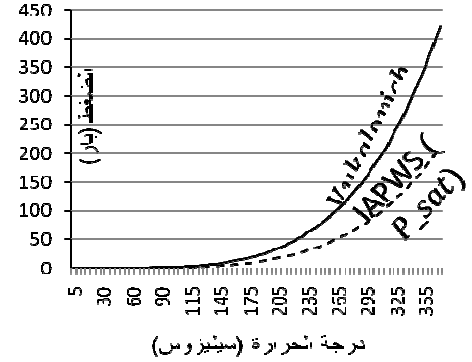
البارامترات	قيم الموديل	قيم فوكالوفيتش
$T\ (°C) = 5°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	0.008726	0.008719
$v\ (m^3/kg$	0.0010001	0.0010001
$u\ (kJ/kg)$	21.0184	**غير موجودة**
$h\ (kJ/kg)$	21.0193	21.05
$s\ (kJ/kg$	0.0763	0.0762
$T\ (°C) = 100°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	1.01418	1.01325
$v\ (m^3/kg$	0.0010435	0.0010435
$u\ (kJ/kg)$	418.993	**غير موجودة**
$h\ (kJ/kg)$	419.0992	419.1
$s\ (kJ/kg$	1.3070	1.3071
$T\ (°C) = 200°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	15.547	15.551
$v\ (m^3/kg$	0.0011565	0.0011565
$u\ (kJ/kg)$	850.5951	**غير موجودة**
$h\ (kJ/kg)$	852.3931	852.4
$s\ (kJ/kg$	2.3308	2.3308
$T\ (°C) = 300°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	85.88	85.92
$v\ (m^3/kg$	0.0014042	0.0014036
$u\ (kJ/kg)$	1332.712	**غير موجودة**
$h\ (kJ/kg)$	1344.8	1344.9
$s\ (kJ/kg$	3.2547	3.2548
B **النقطة** $T\ (°C) = 350°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	165.29	165.37
$v\ (m^3/kg$	0.0017401	0.001741
$u\ (kJ/ky)$	1642.0963	**غير موجودة**
$h\ (kJ/kg)$	1670.86	1671
$s\ (kJ/kg$	3.7783	3.7786

يبين الشكل (2) أن قيم الضغط في جداول فوكالوفيتش أعلى بنحو (0.05%) من القيم المحسوبة في الموديل $(IAPWS - IF97)$ وصولا إلى النقطة الحرجة. طبعاً هذا الفرق غير كبير لأن السائل مضغوط ولا تغييرات كبيرة فيه.نلاحظ أيضاً أن قيم بارامتر الطاقة الداخلية غير موجودة في جداول فوكالوفيتش [11]. أما قيم بارامترات الإنتالبي والإنتروبي في الموديل فتساوي تقريبا القيم الموجودة في جداول فوكالوفيتش مع إهمال الفرق البسيط بينهما.

- القيم على الخط (BD) عند ضغط ودرجة حرارة معينة. على الخط (BD) لا تختلف الرموز بين جداول فوكالوفيتش والمراجع الأجنبية.

الجدول (2) نتائج الطور السائل على الخط (BD)

المنطقة السائلة		
$P\ (MPa) = 30\ MPa, T = 70°C$		
قيم فوكالوفيتش	قيم الموديل	البارامترات
179.88	**179.89**	$T_{sat}(°C)$
096**0.0010**	096**0.0010**	$v\ (m^3/kg)$
غير موجودة	**287.1957**	$u\ (kJ/kg)$
317.8	**317.5**	$h\ (kJ/kg)$
0.9358	**0.9376**	$(kJ/kg\ K)$



الشكل (2) مقارنة ضغط الإشباع

نلاحظ في الجدول السابق بداية ظهور اختلاف في قيم الإنتالبي والإنتروبي. قيم الإنتالبي في الموديل أقل من جداول فوكالوفيتش بحدود(0.1%). أما قيم الإنتروبي في الموديل فهي أعلى من جدالول فوكالوفيتش بحدود (0.2%). لايوجد فرق كبير في قيم الحجم النوعي لأننا مازلنا في منطقة السائل. قيم الطاقة الداخلية غير موجودة.

لتوضيح النتائج في الطور السائل نفرض أن لدينا مضخة وحيدة تعمل في محطة بخارية بسيطة بين ضغط التكثيف الذي يساوي $(8\ kPa)$ وضغط العنفة الذي يساوي $(8\ MPa, 600°C)$. تدفق المحطة هو $(5\ kg/s)$. يعطى عمل المضخة بحسب القانون الأول في الترموديناميك بالعلاقة

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}(h_{exit} - h_{in}) \qquad MW$$

باستخراج قيم الإنتالبي (kJ/kg) من جداول فوكالوفيتش واستخدام البرنامج في استخراج قيم الإنتالبي بحسب الموديل وبتعويضها في العلاقة السابق نجد

البارامتر	h_{exit}	h_{in}	$\dot{W}_{pump}$
فوكالوفيتش	400.18	391.8	0.0419
الموديل	399.93	391.71	0.0411

نلاحظ من الجدول السابق أن عمل المضخة الإيزونتروبي انخفض مقدار (1.91%) باستخدام بارامترات الموديل. بفرض أن هذه المضخة تعمل 24 ساعة يومياً و300 يوم سنوياً فتكون الطاقة اللازمة لتشغيل مضخة واحدة باستخدام بارامترات الموديل أقل من الطاقة اللازمة لتشغيلها باستخدام بارامترات جدول فوكالوفيتش بنحو $(5.76\ MWh)$ سنوياً ويتعاظم هذا الرقم مع ارتفاع تدفق المحطة.

2.2 منطقة الطورالبخاري.

استُخْدمت المعادلات الرياضية في موديل الجمعية الدولية $(IAPWS - IF97)$[4] في حساب بارمترات البخار وتقييمها من حجم نوعي وطاقة داخلية وإنتالبي وإنتروبي وحرارة نوعية عند ضغط ثابت وقُورِنَتْ بقيم جداول فوكالوفيتش المتوافرة لدينا.

1.2.2 بارمترات الوسيط في الطور البخاري.

معادلة جيبس للطاقة (G) في الطور البخاري تنقسم إلى جزءين، جزء مثالي (id) وجزء حقيقي (r). تعطى هذه المعادلات بدلالة الكثافة ودرجة الحرارة وهي على الشكل الآتي [4,7]:

$$G(\rho,T) = R * T * [\gamma^{id}(\pi,\tau) + \gamma^{r}(\pi,\tau)] \qquad (1\text{-}3)$$

- الجزء المثالي يعطى من العلاقة[4,7]

$$\gamma^{id}(\pi,\tau) = ln\pi + \sum_{i=1}^{9} n_i^{id} * \tau^{J_i^{id}} \qquad (2\text{-}3)$$

$$\tau = T^*/T$$
$$\pi = P/P^*$$

إذْ إن

n_i^{id} معامل الطور البخاري للجـزء المثـالي ويعطى في الجدول (2) فـي الملحـق بحسب موديل $(IAPWS - IF97)$.

J_i^{id} معامل قوة في الطور البخاري للجـزء المثالي، ويعطى في الجـدول (2) فـي الملحـق بحـسب موديـل الجمعيـة $(IAPWS - IF97)$.

T^* درجة حرارة مرجعية $(540\ \mathrm{K})$

P^* ضغط مرجعي $(1\ \mathrm{MPa})$

• الجزء الحقيقي يعطى من العلاقة[4,7]

$$\gamma^r(\pi,\tau) = \sum_{i=1}^{43} n_i^r * \pi^{I_i^r} * c^{J_i^r} \qquad (3\text{-}3)$$

$$c^{J_i^r} = (\tau - 0.5)^{J_i^r}$$

$$\pi = P/P^*$$

$$\tau = T^*/T$$

إذْ إن

n_i^r معامل للطور البخـاري للجـزء الحقيقـي ويُعطَى في الجدول (3) في الملحق بحـسب موديل $(IAPWS - IF97)$.

I_i^r معامل قوة في الطـور البخـاري للجـزء الحقيقي، ويعطى في الجدول (3) في الملحق بحسب موديل الجمعية $(IAPWS - IF97)$.

J_i^r معامل قوة في الطـور البخـاري للجـزء الحقيقي، ويُعطَى في الجدول (3) في الملحق بحسب موديل الجمعية $(IAPWS - IF97)$.

P^* ضغط مرجعي$(1\ \mathrm{MPa})$

T^* درجة حرارة مرجعي$(540\ \mathrm{K})$

• الحجم النوعي

$$v = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = \frac{\pi * R * T}{P} * \left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \pi} + \frac{\partial \gamma^r}{\partial \pi}\right)_\tau$$

$$v = \frac{\pi * R * T}{P} * \left(\frac{1}{\pi} + \sum_{i=1}^{43} n_i^r * I_i^r * \pi^{(I_i^r - 1)} * c^{J_i^r}\right)$$

• الطاقة الداخلية

$$u = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P - P\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T$$

$$= R * T * \left\{\tau\left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \tau} + \frac{\partial \gamma^r}{\partial \tau}\right)_\pi - \pi\left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \pi} + \frac{\partial \gamma^r}{\partial \pi}\right)_\tau\right\}$$

• الإنتالبي

$$h = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = R * T * \tau\left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \tau} + \frac{\partial \gamma^r}{\partial \tau}\right)_\pi$$

• الإنتروبي

$$s = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = R * \left[\tau * \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi - \gamma\right]$$

$$s - R * \left[\tau * \left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \tau} + \frac{\partial \gamma^r}{\partial \tau}\right) - \left(\gamma^{id} + \gamma^r\right)\right]$$

• الحرارة النوعية عند ضغط ثابت

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = -R * \tau^2 * \left(\frac{\partial^2 \gamma^{id}}{\partial \tau^2} + \frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \tau^2}\right)_\pi$$

إذْ إن

$$\left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \tau}\right)_\pi = \sum_{i=1}^{9} n_i^{id} * J_i^{id} * \tau^{J_i^{id} - 1}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \gamma^{id}}{\partial \tau^2}\right)_\pi = \sum_{i=1}^{9} n_i^{id} * J_i^{id} * \left(J_i^{id} - 1\right) * \tau^{J_i^{id} - 2}$$

$$\left(\frac{\partial \gamma^r}{\partial \tau}\right)_\pi = \sum_{i=1}^{43} n_i^r * \pi^{I_i^r} * J_i^r * c^{J_i^r - 1}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \tau^2}\right)_\pi = \sum_{i=1}^{43} n_i^r * \pi^{I_i^r} * J_i^r * (J_i^r - 1) * c^{J_i^r - 2}$$

$$\left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \pi}\right)_\tau = \frac{1}{\pi}$$

$$\left(\frac{\partial \gamma^r}{\partial \pi}\right)_\tau = \sum_{i=1}^{43} n_i^r * \pi^{I_i^r - 1} * I_i^r * c^{J_i^r}$$

2.2.2 حدود الحساب في الطور البخاري.

يعطي موديل الجمعية $(IAPWS - IF97)$حدود درجة الحرارة والضغط في منطقة البخار كما يأتي:

على الخط (AB)

$$0°C\ (273.15\ K) < T < 350°C\ (623.15\ K)$$

$$0 < P < P_s(t)$$

على الخط (BE)

$$350°C\ (623.15\ K) < T < 590°C\ (863.15\ K)$$

$$0 < P \leq P\ (T)$$

مابعد الخط من (F) العامودي على محور درجة الحرارة وعند $(863.15\ K)$

$$590.35°C\ (863.15\ K) < T < 800°C\ (1073.15\ K)$$

$$0 < P \leq 100\ MPa$$

3.2.2 مقارنة النتائج.

بُرمجت المعطيات والمعادلات الموجودة في الموديل $(IAPWS - IF97)$ باستخدام برنامج MVBA للحصول على البارمترات المذكورة سابقاً كلّها ثُم قُورِنَتْ هذه القيم بالقيم الموجودة في جداول فوكالوفيتش المتوافرة لدينا.

• مقارنة القيم على الخط (AB) بدلالة درجة الحرارة (خط الإشباع حيث قيم كسر الجفاف تساوي الواحد). البارامترات في جداول فوكالوفيتش تعطى الرمز (y'') في حين تعطى في المراجع الأجنبية التي تعتمد في قيمها على موديل الجمعية $(IAPWS - IF97)$ بالرمز (y_g)[5].

الجدول (3) نتائج الطور البخاري على الخط (AB)

البارامترات	قيم الموديل	قيم فوكالوفيتش
$T\ (°C) = 5°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	0.008726	0.008719
$v\ (m^3/kg$	147	147.2
$u\ (kJ/kg)$	2381.79	غير موجودة
$h\ (kJ/kg)$	2510.1	2510
$s\ (kJ/kg$	9.0249	9.0241
$T\ (°C) = 100°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	1.01418	1.01325
$v\ (m^3/kg$	1.672	1.673
$u\ (kJ/kg)$	2506.015	غير موجودة
$h\ (kJ/kg)$	2675.57	2676
$s\ (kJ/kgK$	7.3541	7.3547
$T\ (°C) = 200°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	15.547	15.551
$v\ (m^3/kg$	0.1272	0.1272
$u\ (kJ/kg)$	2594.27	غير موجودة
$h\ (kJ/kg)$	2792.06	2793
$s\ (kJ/kgK$	6.4303	6.4318
$T\ (°C) = 300°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	85.88	85.92
$v\ (m^3/kg$	0.02166	0.02164
$u\ (kJ/kg)$	2563.54	لا يوجد
$h\ (kJ/kg)$	2749.57	2749
$s\ (kJ/kgK)$	5.7058	5.7049
النقطة B $T\ (°C) = 350°C$		
$P_{sat}\ (bar)$	165.29	165.37
$v\ (m^3/kg$	0.008801	0.008803
$u\ (kJ/kg)$	2418.12	غير موجودة
$h\ (kJ/kg)$	2563.59	2565
$s\ (kJ/kgK$	5.2109	5.2117

نلاحظ أن قيم والإنتالبي والإنتروبي في الموديل $(IAPWS - IF97)$ تختلف عن القيم الموجودة في جداول فوكالوفيتش بمقدار (0.06%) عند درجات حرارة مرتفعة.

• القيم على الخط (BE) (منطقة البخار المحمص **Superheated Vapor**). على الخط (BE) لاتختلف الرموز بين جداول فوكالوفيتش والمراجع الأجنبية.

الجدول (4) نتائج الطور البخاري على الخط (BE)

المنطقة البخارية		
$P\ (MPa) = 30\ MPa, T = 500°C$		
قيم فوكالوفيتش	قيم الموديل	البارامترات
179.88	**179.89**	$T_{sat}(°C)$
0.00869	**0.00869**	$v\ (m^3/kg$
غير موجودة	**2824.08**	$u\ (kJ/ky)$
3078	**3084.79**	$h\ (kJ/kg)$
5.799	**5.7956**	$s\ (kJ/kg$

نلاحظ اختلافاً في قيم الإنتالبي والإنتروبي بين الموديل $(IAPWS - IF97)$ وجداول فوكالوفيتش بنحو [0.22%]، وهي أيضاً قيم كبيرة عند حساب العمل المفيد في الدورات البخارية. أما قيم الحجم النوعي فهي قريبة. لا وجود لقيم الطاقة الداخلية في جداول فوكالوفيتش.

لتوضيح النتائج في الطور البخاري نفرض أن لدينا عنفة تعمل في محطة بخارية بسيطة بين ضغط العنفة$(8\ MPa, 600°C)$ وضغط التكثيف الذي يساوي$(8\ kPa)$. تدفق المحطة هو$(5\ kg/s)$. يعطى عمل العنفة بحسب القانون الأول في الترموديناميك بالعلاقة

$$\dot{W}_{turbine} = \dot{m}(h_{in} - h_{exit}) \quad MW$$

باستخراج قيم الإنتالبي (kJ/kg)من جداول فوكالوفيتش واستخدام البرنامج في استخراج قيم الإنتالبي بحسب الموديل وبتعويضها في العلاقة السابقة نجد:

البارامتر	h_{in}	h_{exit}	$\dot{W}_{turbine}$
فوكالوفيتش	3640	2513.1!	5.6344
الموديل	3642.4	2512.8!	5.6476

نلاحظ أن عمل العنفة الإيزونتروبي ازداد بمقدار (1.32%) باستخدام بارامترات الموديل. بفرض أن العنفة تعمل 24 ساعة مدة 300 يوم في توليد الكهرباء فإن استخدام بارامترات الموديل تعطي عملاً أكبر من العمل الناتج من استخدام بارامترات جداول فوكالوفيتش بمقدار $(95.04\ MWh)$ سنوياً ويتعاظم هذا الرقم مع زيادة تدفق المحطة.

3.2 منطقة الطور الحرج.

استُخْدِمت المعادلات الرياضية في موديل الجمعية الدولية $(IAPWS - IF97)$[4] في حساب بارمترات البخار وتقييمها من حجم نوعي وطاقة داخلية وإنتالبي وإنتروبي وحرارة نوعية عند ضغط ثابت وفُورِنَتْ بقيم جداول فوكالوفيتش المتوافرة لدينا.

1.3.2 معادلات الطورالحرج.

تحدد بارامترات الحالة الحرجة من معادلة هلمهولتس للطاقة الحرة (f) في الطور الحرج بدلالة كثافة ودرجة الحرارة وتعطى من الشكل:

$$f(\rho, T) = R * T * \emptyset(\delta, \tau) \qquad (1\text{-}4)$$

$$\tau = T_c/T = T^*/T$$

$$\emptyset(\delta, \tau) = n_1 * ln\,\delta + \sum_{i=2}^{40} n_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i}$$

$$\delta = \rho/\rho^* = \rho/\rho_c$$

إذْ إن

n_i معامل للطور الحرج، ويعطى في الجدول (4) في الملحق بحسب موديل $(IAPWS\ \ IF97)$

I_i معامل قوة في الطور الحرج، ويعطى في الجدول (4) في الملحق بحسب موديل $(IAPWS - IF97)$.

J_i معامل قوة في الطور الحرج، ويعطى في الجدول (4) في الملحق بحسب موديل $(IAPWS - IF97)$.

ρ_c الكثافة الحرجة$(322\ kg/m^3)$

T_c درجة حرارة الحرجة $(647.096\ K)$

- الضغط

$$P = \rho^2 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho}\right)_T$$
$$= \rho * R * T * \delta * \left(\frac{\partial \emptyset}{\partial \delta}\right)_\tau$$
$$P = \rho * R * T * \left(n_1 + \delta \sum_{i=2}^{40} n_i * I_i * \delta^{I_i - 1} * \tau^{J_i}\right)$$

- الطاقة الداخلية

$$u = f - T\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_\rho$$
$$= R * T * \tau * \left(\frac{\partial \emptyset}{\partial \tau}\right)_\delta$$
$$u = R * T * \tau * \sum_{i=2}^{40} n_i * J_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i - 1}$$

- الإنتالبي

$$h = G - T\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_\rho + \rho\left(\frac{\partial f}{\partial \rho}\right)_T$$
$$= R * T * \left\{\tau\left(\frac{\partial \emptyset}{\partial \tau}\right)_\delta + \delta\left(\frac{\partial \emptyset}{\partial \delta}\right)_\tau\right\}$$
$$\tau\left(\sum_{i=2}^{40} n_i * J_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i - 1}\right) + \left(n_1 + \delta \sum_{i=2}^{40} n_i * I_i * \delta^{I_i - 1} * \tau^{J_i}\right)\Bigg\}$$

- الإنتروبي

$$s = -\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_\rho = R * \left[\tau * \left(\frac{\partial \emptyset}{\partial \tau}\right)_\delta - \emptyset\right]$$
$$\left(\sum_{i=2}^{40} n_i * J_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i - 1}\right) - \left(n_1 * \ln \delta + \sum_{i=2}^{40} n_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i}\right)\Bigg]$$

- الحرارة النوعية عند حجم ثابت

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_\rho$$
$$= -R * \tau^2 * \left(\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial \tau^2}\right)_\delta$$
$$* \tau^2 * \left(\sum_{i=2}^{40} n_i * J_i * (J_i - 1) * \delta^{I_i} * \tau^{J_i - 2}\right)$$

2.3.2 حدود الحساب في الطورالحرج.

موديل $(IAPWS - IF97)$ يعطي حدود الحساب في الطور الحرج كما في الشكل (1) كما يأتي:

$$350°C\ (623.15\ K) < T < T(P)$$
$$P\ (T) < P \leq 100MPa$$

4.2 معادلات الخط (AB).

يمكن إيجاد معادلة ضغط الإشباع ودرجة حرارة الإشباع من معادلة الخط (ABC) من الشكل الآتي:

$$\beta^2 * \vartheta) + (n_2\beta^2) + (n_3\beta * \vartheta^2) * (n_4\beta * \vartheta) + (n_5\beta) + (n_6\vartheta^2) + (n_7\vartheta) + n_8 - 0 \quad (1\text{-}5)$$

$$\beta = (P_s/P^*)^{0.25}$$
$$\vartheta = T_s/T^* + \frac{n_9}{[(T_s/T^*) - n_{10}]}$$

إذْ إن

P^* ضغط الإشباع $(1\ MPa)$

T^* درجة حرارة الإشباع $(1\ K)$

قيم (n) تأخذ من الجدول (5) الموجودة في الملحق.يحسب الإنتالبي والإنتروبي من معادلات الطور السائل في وصف الحالة السائلة المشبعة ومن معادلات الطور البخاري في وصف الحالة البخارية المشبعة. عند حل المعادلة الواصفة للخط (ABC) السابقة (1-5) بدلالة الضغط الإشباع نجد معادلة ضغط الإشباع ومعادلة درجة حرارة الإشباع.

1.4.2 معادلة ضغط الإشباع.

$$\frac{P_s}{P^*} = \left\{\frac{2C}{-B + (B^2 - 4AC)^{0.5}}\right\}^4 \quad (2\text{-}5)$$
$$A = \vartheta^2 + n_1\vartheta + n_2$$
$$B = n_3\vartheta^2 + n_4\vartheta + n_5$$
$$C = n_6\vartheta^2 + n_7\vartheta + n_8$$

حدود معادلة ضغط الإشباع.

موديل $(IAPWS-IF97)$ يعطي حدود الحساب في معادلة ضغط الإشباع كما يأتي:

$$0℃\,(273.15\,K) < T < 373.946℃\,(647.096\,K)$$

2.4.2 معادلة درجة حرارة الإشباع.

$$\frac{T_s}{T^*} = \frac{n_{10}+D}{2} - \frac{[(n_{10}+D)^2 - 4(n_9+n_{10}D)]^{0.5}}{2} \qquad (3\text{-}5)$$

$$D = \frac{2G}{-F-(F^2-4EG)^{0.5}}$$

$$E = \beta^2 + n_3\beta + n_6$$

$$F = n_1\beta^2 + n_4\beta + n_7$$

$$G = n_2\beta^2 + n_5\beta + n_8$$

حدود معادلة درجة حرارة الإشباع.

موديل $(IAPWS-IF97)$ يعطي حدود الحساب في معادلة درجة حرارة الإشباع كما يأتي:

$$611.213\,Pa \leq P \leq 22.064\,MPa$$

3. الخاتمة والتوصيات.

• القيم المحسوبة من الموديل الموضوع من قبل $(IAPWS-IF97)$ تختلف عن القيم الموجودة في جداول فوكالوفيتش المتوافرة لجامعة دمشق، ويظهر الاختلاف واضحاً عند استعمالها في حساب الأعمال والطاقات المقدمة والمطروحة في الدورات البخارية.

لتوضيح النتائج نفرض أن لدينا محطة بخارية بسيطة تعمل بين ضغط $(8\,MPa, 600℃)$ وضغط التكثيف الذي يساوي$(8\,kPa)$. تدفق المحطة هو $(5\,kg/s)$.

يعطى مردود المحطة بالعلاقة:

$$\eta_{th} = {}^{W_{net}}/_{Q_{in}}$$

باستخراج قيم الإنتالبي (kJ/kg) من جداول فوكالوفيتش واستخدام البرنامج في استخراج قيم الإنتالبي بحسب الموديل وبتعويضها في العلاقة السابقة نجد:

البارامتر	W_{net}	Q_{in}	η_{th}
فوكالوفيتش	5.5924	16.199	34.523%
الموديل	5.6065	16.212	34.582%

نلاحظ أن مردود المحطة ازداد بمقدار (0.17%) باستخدام بارامترات الموديل.

• الضغط في حالة الإشباع في الموديل أقل من جداول فوكالوفيتش، ويؤثر هذا في الناحية التصميمية للأجهزة المستعملة في الدورة.

• في مجال الطور السائل والبخار - خارج خطوط الإشباع وداخلها- نجد أن الاختلاف بين البارمترات كلّها ملحوظ ولا يمكن إهماله.

• أُضيفَتْ قيم الطاقة الداخلية وغير الموجودة في جداول فوكالوفيتش.

• أُضيفَتْ معادلات الحرارة النوعية عند ضغط ثابت وحجم ثابت.

• نقترح اعتماد المعادلات في الموديل $(IAPWS-IF97)$ والقيم المستخرجة عنه في البحث العلمي وفي دراسة بارامترات الدورات البخارية المعروفة.

• نقترح الاشتراك كدولة في الجمعية الدولية لمواصفات للماء والبخار للمشاركة في الأعمال البحثية والعلمية في هذا المجال.

الجدول (1) – قيم الثوابت في المعادلة (2-1) في منطقة السائل بحسب موديل IAPWS-IF97

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	0	-2	0.146 329 712 131 67	18	2	3	-0.441 418 453 308 46 $*10^{-5}$
2	0	-1	-0.845 481 871 691 14	19	2	17	-0.726 949 962 975 94$*10^{-15}$
3	0	0	-0.375 636 036 720 40$*10^{1}$	20	3	-4	-0.316 796 448 450 54$*10^{-4}$
4	0	1	0.338 551 691 683 85$*10^{1}$	21	3	0	-0.282 707 979 853 12$*10^{-5}$
5	0	2	-0.957 919 633 878 72	22	3	6	-0.852 051 281 201 03$*10^{-9}$
6	0	3	0.157 720 385 132 28	23	4	-5	-0.224 252 819 080 00$*10^{-5}$
7	0	4	-0.166 164 171 995 01$*10^{-1}$	24	4	-2	-0.651 712 228 956 01$*10^{-6}$
8	0	5	0.812 146 299 835 68$*10^{-3}$	25	4	10	-0.143 417 299 379 24$*10^{-12}$
9	1	-9	0.283 190 801 238 04$*10^{-3}$	26	5	-8	-0.405 169 968 601 17$*10^{-6}$
10	1	-7	-0.607 063 015 658 74$*10^{-3}$	27	8	-11	-0.127 343 017 416 41$*10^{-8}$
11	1	-1	-0.189 900 682 184 19$*10^{-1}$	28	8	-6	-0.174 248 712 306 34$*10^{-9}$
12	1	0	-0.325 297 487 705 05$*10^{-1}$	29	21	-29	-0.687 621 312 955 31$*10^{-18}$
13	1	1	-0.218 417 171 754 14$*10^{-1}$	30	23	-31	0.144 783 078 285 21$*10^{-19}$
14	1	3	-0.528 383 579 699 30$*10^{-4}$	31	29	-38	0.263 357 816 627 95$*10^{-22}$
15	2	-3	-0.471 843 210 732 67$*10^{-3}$	32	30	-39	-0.119 476 226 400 71$*10^{-22}$
16	2	0	-0.300 017 807 930 26$*10^{-3}$	33	31	-40	0.182 280 945 814 04$*10^{-23}$
17	2	1	0.476 613 939 069 87$*10^{-4}$	34	32	-41	-0.935 370 872 924 58$*10^{-25}$

الجدول (2) – قيم الثوابت في المعادلة (2-3) قوى الجزء المثالي في المعادلة (1-3) في منطقة البخار بحسب موديل IAPWS-IF97.

i	J_i^{id}	n_i^{id}	i	J_i^{id}	n_i^{id}
1	0	-0.969 276 865 002 17 10^{1}	6	-2	0.142 408 191 714 44$*10^{1}$
2	1	0.100 866 559 680 18$*10^{2}$	7	-1	-0.438 395 113 194 50$*10^{1}$
3	-5	-0.560 879 112 830 20$*10^{-2}$	8	2	-0.284 086 324 607 72
4	-4	0.714 527 380 814 55$*10^{-1}$	9	3	0.212 684 637 533 07$*10^{-1}$
5	-3	-0.407 104 982 239 28			

الجدول (3) – قيم الثوابت في المعادلة (3-3) قوى الجزء الحقيقي في المعادلة (3-1) في منطقة البخار بحسب موديل IAPWS-IF97.

i	I_i^r	J_i^r	n_i^r	i	I_i^r	J_i^r	n_i^r
1	1	0	-0.177 317 424 732 13 $*10^{2}$	23	7	0	**-0.590 595 643 242 70$*10^{-17}$**
2	**1**	**1**	**-0.178 348 622 923 58$*10^{1}$**	**24**	**7**	**11**	-0.126 218 088 991 01$*10^{5}$
3	1	2	-0.459 960 136 963 65$*10^{1}$	25	7	25	**-0.389 468 424 357 39$*10^{1}$**
4	**1**	**3**	**-0.575 812 590 834 32$*10^{1}$**	**26**	**8**	**8**	0.112 562 113 604 59$*10^{-10}$
5	1	6	-0.503 252 787 279 30$*10^{1}$	27	8	36	**-0.823 113 408 979 98$*10^{1}$**
6	**2**	**1**	**-0.330 326 416 702 03$*10^{4}$**	**28**	**9**	**13**	0.198 097 128 020 88$*10^{7}$
7	2	2	-0.189 489 875 163 15$*10^{3}$	29	10	4	**0.104 069 652 101 74$*10^{18}$**
8	**2**	**4**	**-0.393 927 772 433 55$*10^{2}$**	**30**	**10**	**10**	-0.102 347 470 959 29$*10^{12}$
9	2	7	-0.437 972 956 505 73$*10^{1}$	31	10	14	**-0.100 181 793 795 11$*10^{8}$**
10	**2**	**36**	**-0.266 745 479 140 87$*10^{4}$**	**32**	**16**	**29**	-0.808 829 086 469 85$*10^{10}$
11	3	0	0.204 817 376 923 09$*10^{7}$	33	16	50	**0.106 930 318 794 09**
12	**3**	**1**	**0.438 706 672 844 35$*10^{6}$**	**34**	**18**	**57**	-0.336 622 505 741 71
13	3	3	-0.322 776 772 385 70$*10^{4}$	35	20	20	**0.891 858 453 554 21$*10^{24}$**
14	**3**	**6**	**-0.150 339 245 421 48$*10^{2}$**	**36**	**20**	**35**	0.306 293 168 762 32$*10^{12}$
15	3	35	-0.406 682 535 626 49$*10^{1}$	37	20	48	**-0.420 024 676 982 08$*10^{5}$**
16	**4**	**1**	**-0.788 473 095 593 67$*10^{9}$**	**38**	**21**	**21**	-0.590 560 296 856 39$*10^{25}$
17	4	2	0.127 907 178 522 85$*10^{7}$	39	22	53	**0.378 269 476 134 57$*10^{5}$**
18	**4**	**3**	**0.482 253 727 185 07$*10^{6}$**	**40**	**23**	**39**	-0.127 686 089 346 81$*10^{14}$
19	5	7	0.229 220 763 376 61$*10^{5}$	41	24	26	**0.730 876 105 950 61$*10^{28}$**
20	**6**	**3**	**-0.167 147 664 510 61$*10^{10}$**	**42**	**24**	**40**	0.554 147 153 507 78$*10^{16}$
21	6	16	-0.211 714 723 213 55$*10^{2}$	43	24	58	**-0.943 697 072 412 10$*10^{6}$**
22	**6**	**35**	**-0.238 957 419 341 04$*10^{2}$**				

الجدول (4) – قيم الثوابت في المعادلة (4-1) في منطقة الطور الحرج بحسب موديل IAPWS-IF97.

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	-	-	0.106 580 700 285 13*10^{1}	21	3	4	**-0.201 899 150 235 70*10^{1}**
2	**0**	**0**	**-0.157 328 452 902 39*10^{2}**	**22**	**3**	**16**	-0.821 476 371 739 63*10^{-2}
3	0	1	0.209 443 969 743 07*10^{2}	23	3	26	**-0.475 960 357 349 23**
4	**0**	**2**	**-0.768 677 078 787 16*10^{1}**	**24**	**4**	**0**	0.439 840 744 735 00*10^{-1}
5	0	7	0.261 859 477 879 54*10^{1}	25	4	2	**-0.444 764 354 287 39**
6	**0**	**10**	**-0.280 807 811 486 20*10^{1}**	**26**	**4**	**4**	0.905 720 707 197 33
7	0	12	0.120 533 696 965 17*10^{1}	27	4	26	**0.705 224 500 879 67**
8	**0**	**23**	**-0.845 668 128 125 02*10^{-2}**	**28**	**5**	**1**	0.107 705 126 263 32
9	1	2	-0.126 543 154 777 14*10^{1}	29	5	3	**-0.329 136 232 589 54**
10	**1**	**6**	**-0.115 244 078 066 81*10^{1}**	**30**	**5**	**26**	-0.508 710 620 411 58
11	1	15	0.885 210 439 843 18	31	6	0	**-0.221 754 008 730 96*10^{-1}**
12	**1**	**17**	**-0.642 077 651 816 07**	**32**	**6**	**2**	0.942 607 516 650 92*10^{-1}
13	2	0	0.384 934 601 866 71	33	6	26	**0.164 362 784 479 61**
14	**2**	**2**	**-0.852 147 088 242 06**	**34**	**7**	**2**	-0.135 033 722 413 48*10^{-1}
15	3	**6**	0.489 722 815 418 77*10^{1}	35	8	26	**-0.148 343 453 524 72*10^{-1}**
16	**2**	**7**	**-0.305 026 172 569 65*10^{1}**	**36**	**9**	**2**	0.579 229 536 280 84*10^{-3}
17	2	22	0.394 205 368 791 54*10^{-1}	37	9	26	**0.323 089 047 037 11*10^{-2}**
18	**2**	**26**	**0.125 584 084 243 08**	**38**	**10**	**0**	0.809 648 029 962 15*10^{-4}
19	3	0	-0.279 993 296 987 10	39	10	1	**-0.165 576 797 950 37*10^{-3}**
20	**3**	**2**	**0.138 997 995 694 60*10^{1}**	**40**	**11**	**26**	-0.449 238 990 618 15*10^{-4}

الجدول (5) قيم n في المعادلة (5-1) للخط ABC والمعادلة (5-2) لضغط الإشباع والمعادلة (5-3) لدرجة حرارة الإشباع.

i	n_i	i	n_i
1	0.116 705 214 527 67*10^{4}	6	**0.149 151 086 135 30*10^{2}**
2	**-0.724 213 167 032 06*10^{6}**	**7**	-0.482 326 573 615 91*10^{4}
3	-0.170 738 469 400 92*10^{2}	8	**0.405 113 405 420 57*10^{6}**
4	**0.120 208 247 024 70*10^{5}**	**9**	-0.238 555 575 678 49
5	-0.323 255 503 223 33*10^{7}	10	**0.650 175 348 447 98*10^{3}**

4. المراجع*

المرجع باللغة الإنكليزية

[1] IAPWS, 2009, "Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamics Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use," Doorwerth, the Netherlands.

[2] Kretzschmar, H., J., Knobloch, K., 2008, "Supplementary Backward Equations for the Industrial Formulation IAPWS-IF97 of Water and Steam for Fast Calculations of Heat Cycles, Boilers, and Steam Turbines," 14th International Conference on the Properties of Water and Steam in Kyoto.

[3] Kalova, J., Mares, R., 2008, "Equations for the Thermodynamic Properties at the Saturation Line in the Supercooled Water Region," ICPWS XV, Berlin.

[4] Cooper, J. R., Dooley, R. B., 2007, "Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (The revision only relates to the extension of region 5 to 50 MPa)," August, Lucerne, Switzerland.

[5] ASME, 2006, "ASME Steam Tables, Compact Edition."

[6] Wagner, W., Pruf, A., 2002, "The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamics Properties of Ordinary Water Substance."

[7] Wagner, W., Cooper, J.R., Dittmann, A., Kijima, J., Kretzschmar, H., J., Kruse, A., Mares, R., Oguchi, K., Sato, H.,Sifner, O., Takaishi, Y., Tanishita, I., Trubenbach, J., and Willkimmen, Th., 2000, "The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamics Properties of Water and Steam," J. Eng.,Gas Turbine & Power 122, 150-182.

[8] Cengel, Y.,A., Boles, M., A., 2006, "Thermodynamics, An Engineering Approach," Fifth Edition, McGraw Hill, Appendix, Table A-4 to A7, Page 890-898.

[9] Moran, M., J., Shapiro, H.N., 2006, "Fundamental of Engineering Thermodynamics," Fifth Edition, Wiley & Sons, Inc., Index to tables, Table A2 to A5, Pages 720 – 729.

[10] Sonntag, R. E., Borgnakke, C., 2009, "Fundamental of Thermodynamics," Seventh Edition, Wiley & Sons, Inc., Appendix B, Table B 1, Pages 776 – 791.

المراجع باللغة العربية

[11] هلال، م.، 2010، "ملحق الترموديناميك التكنيكـي (الجداول)" منشورات جامعة دمشق.

المراجع في الإنترنت

[12] www.iapws.org
[13] webbook.nist.org
[14] www.steamtablesonline.com

* تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2013/1/28