

القياس التجريبي لانتقال الحرارة بالحمل الحر من اسطوانة شاقولية

د. م. نصر ياسين*

الملخص

قامت في المدة الأخيرة ثورة في الحسابات الهندسية تمثلت بنمذجة العمليات والإجراءات الهندسية ومحاكاتها عن طريق العديد من البرامج الخاصة بالنمذجة والمحاكاة. ومن بين هذه العمليات كانت عملية انتقال الحرارة، التي تطرّق لها العديد من الباحثين. استُخدِمَ في هذا المقال جهاز صنّع في العام 2010 في جامعة دمشق خصّص لقياس انتقال الحرارة بالحمل الحر والإشعاع من سطح اسطوانة تسخين ماء منزلية شاقولية، كذلك تربيّة عملية انتقال الحرارة بالحمل من سطح الاسطوانة بقياس تدرج درجات الحرارة بين الاسطوانة والهواء المحيط بها. الذي تم عن طريق مصفوفة من الحساسات متوضعة باتجاه انتقال الحرارة. وبعدها، وعن طريق دائرة إلكترونية، تُحوّل البيانات وتُنقل إلى حاسب آلي لتُعالج البيانات الصادرة عن الجهاز وتُحسب أخطاء القياس ويُرسَم منحنى انتقال الحرارة من السطح ويُظهر على شاشة الحاسب. وفُورِيت القيمة المقيسة بالقيمة المحسوبة وفق العلاقات المقدمة من قبل الجمعية الأمريكية للقياسات الحرارية *ASTM* للسطوح نفسه، وكان التقارب في القيمة واضحاً. يمكن الاعتماد على الجهاز، مع مئّماته من العينات، لعمل تجارب في انتقال الحرارة بالحمل الحر ضمن مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية. كما يمكن قياس انتقال الحرارة بالحمل القسري من السطح سابقة الذكر، بعد تعديل مصفوفة الحساسات وبرنامج معالجة النتائج بما يتلاءم وانتقال الحرارة بالحمل القسري.

الكلمات المفتاحية: انتقال الحرارة، الحمل الحر، انتقال الحرارة من اسطوانة شاقولية، معادلات انتقال الحرارة

* أستاذ مساعد قسم الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق Dr.naser58@yahoo.com

الرموز والمصطلحات

الرمز	التسمية	الوحدة
T_s	درجة حرارة السطح	$^{\circ}C$
T_i	درجة حرارة الهواء الداخلي	$^{\circ}C$
Ra	عدد راييلي	لا بعدي
T_{∞}	درجة حرارة الهواء الداخلي للتيار غير المشوش	$^{\circ}C$
Nu	عدد نوسلت	لا بعدي
h_L	عامل انتقال الحرارة الوسطي بالحمل	$W/(m^2 \ ^{\circ}C)$
h_x	عامل انتقال الحرارة الموضعي بالحمل	$W/(m^2 \ ^{\circ}C)$
Gr	عدد غراشوف	لا بعدي
$\partial T / \partial y$	تدرج درجات الحرارة بالاتجاه y	$^{\circ}C/m$
k	عامل انتقال الحرارة بالتوصيل	$W/(m \ ^{\circ}C)$
q_y''	التدفق الحراري النوعي بالاتجاه y	w/m^2
$\partial p / \partial x$	تدرج الضغط بالاتجاه x	Pa/m
ρ_{∞}	كثافة الهواء للتيار غير المشوش	kg/m^3
g	تسارع الجاذبية الأرضية	m/s^2
β	عامل التمدد الحراري الحجمي	$1/^{\circ}k$
R	ثابت الغازات العام	$R=8.314472 \ J. K^{-1}.mol^{-1}$
Re	عدد رينولدز	لا بعدي
Pr	عدد براندل	لا بعدي
ν	اللزوجة الحركية	m^2/s
α	الانتشار الحراري	m^2/s
μ	اللزوجة التحريكية	$Pa \ s$
c_p	الحرارة النوعية بثبوت الضغط	$J/(kg \ K)$
\bar{T}	القيمة المتوسطة لمجموعة قراءات درجات الحرارة	$^{\circ}C$
n	عدد مرات تكرار تجربة	مرة
di	الانحراف عن القيمة المتوسطة لقراءة درجة حرارة معينة	$^{\circ}C$
\square	الانحراف المعياري لقيمة درجة حرارة معينة	$^{\circ}C$
U	الخطأ الكلي (عدم دقة قراءة درجة حرارة معينة)	$W/m^2 \ ^{\circ}C$
$t = a - e^{bx}$	معادلة نيوتن في التبريد	$^{\circ}C$

1. المقدمة:

إن العوامل الأساسية في الحسابات الحرارية للتكييف والتبريد والتدفئة هي إيجاد معاملات الانتقال الحراري. ومع تطور العلوم وتقنيات التصنيع في إيجاد الخلائط ومواد البناء وكودات جديدة كان من الضروري تحديد معاملات انتقال الحرارة لها، فقامت العديد من الدراسات على ذلك، وتوصلت إلى معاملات إغتمد عليها. لكن معظم هذه الدراسات قامت على أسس نمذجة للمعادلات الأساسية، ولم تكن عن طريق القياس، وبعضها الآخر أُقيم على أسس قياس لبعض الحالات الخاصة، كقياس معامل الانتقال الحراري الوسطي في الأفران مثلاً [9].

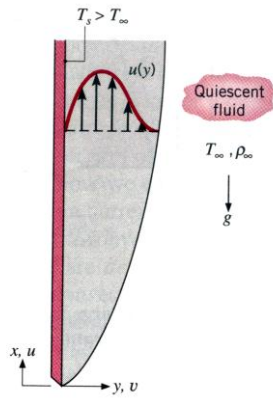
تنتقل الحرارة بعدة طرائق هي التوصيل والحمل والإشعاع ولا تقل إحداها شأنًا عن الأخرى. ولكل طريقة منها معاملها الخاص. وهذه المعاملات هي: معامل انتقال الحرارة بالحمل، ومعامل انتقال الحرارة بالتوصيل ومعامل انتقال الحرارة بالإشعاع، ولكل مكانه. فانتقال الحرارة بالحمل يجري فيه انتقال الطاقة عن طريق حركة السائل (الغاز أو المائع) [Burmeister 1983, Kays and Crawford 1980]. وانتقال الحرارة بالتوصيل هو آلية انتقال الحرارة التي تنتقل فيها الطاقة بين الجزيئات عن طريق التماس بواسطة انتقال الطاقة الحركية بين الجزيئات. فتحدث العملية في الغازات عن طريق التصادم المرن بين الجزيئات، في حين في السوائل والأجسام الصلبة غير الناقلة كهربائياً يعتقد حدوثها عن طريق تذبذب الهيكل الشبكي (الحركة الترددية للهيكل الشبكي للجزيئات). وأمّا انتقال الحرارة بالإشعاع فنقوم العناصر فيه ببث الإشعاعات الحرارية من سطحها عندما تكون درجة حرارتها أعلى من الصفر المطلق، وتكون هذه الإشعاعات على شكل فوتونات متغيرة التردد. وهنا لا حاجة لجسم ناقل لهذه الفوتونات (على عكس طرائق انتقال الحرارة السابقة). فتعتمد كمية الحرارة الصادرة عن العنصر على درجة حرارته المطلقة وخصائصه. تنتقل الطاقة بين سطحين (أو جسمين) بدرجتين

حرارة مختلفتين على مرأى من بعضها بعضاً، وتعتمد كمية الطاقة المنتقلة من أحدهما إلى الآخر على الحجم النسبية والأشكال والتوجيه ودرجات حرارتها ومعاملات الابتعاث والامتصاص [1].

2. المفاهيم الأساسية:

إن معامل الانتقال الحراري بالتوصيل خاصة فيزيائية متعلقة بالجسم بحد ذاته، وحُدِّثت المعاملات لكثير من المواد المستخدمة في الحياة العملية. كذلك حُدِّثت معاملات الابتعاث والامتصاص الحراري لكثير من المواد (التي بدورها تحدد معاملات انتقال الحرارة بالإشعاع) في حين يبقى المعامل الأخير ألا وهو معامل الانتقال الحراري بالحمل. قامت مجموعة كبيرة من الدراسات لتحديد هذا المعامل الذي يتعلق بمجموعة كبيرة من المعاملات الأخرى. منها الفيزيائية المتعلقة بالجسم، ومنها المتعلقة بالوسط المحيط. وحُدِّثت هذه المعاملات تجريبياً لبعض التطبيقات الهندسية.

نختص في بحثنا بانتقال الحرارة بالحمل الحر. وحالتنا هي استخدام جهاز لقياس انتقال الحرارة لسطوح شاقولية. كما في الشكل:



الشكل (1)

من معادلة فورييه بالاتجاه y للسطح نجد أن:

$$q_x'' = -k \frac{\partial T(x,0,z)}{\partial y}$$

و $\frac{\partial T(x,0,z)}{\partial y}$ تدرج درجات الحرارة في السائل، و k

لصفيحة الشاقولية

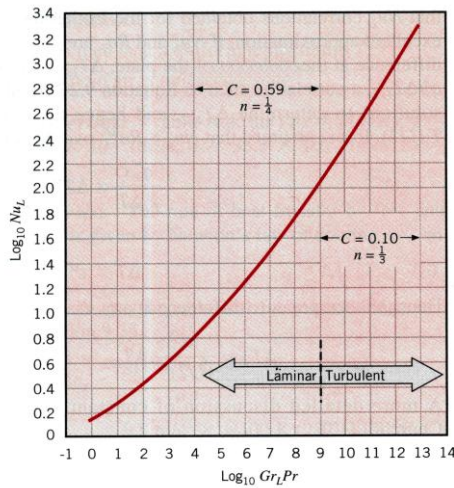
هناك صيغ مشابهة لشكل المعادلة (4) لحالة الصفيحة الشاقولية [7]. إذ يعتمد العامل C والأس n على مجال عدد راييلي. ولعدد راييلي الأقل من 10^4 يمكن الحصول على عدد نوسلت من المخطط بالشكل (2). كما طُوِّرت علاقة يمكن تطبيقها على كامل مجال عدد راييلي التي أوصى بها *Churchill and Chu* وغيرهم [2, 3, 4, 5, 6] وهي من الشكل الآتي:

$$\bar{Nu}_L = \left[0.825 + \frac{0.38Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (6)$$

ومع أن المعادلة (6) مناسبة لمعظم الحسابات الهندسية فإننا نستطيع الحصول على دقة أكبر بشكل طفيف للجريان الصفائحي [8] (وأوردها [10] أيضاً) باستخدام العلاقة:

$$\bar{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad (7)$$

$Ra_L \leq 10^9$



الشكل (2) عدد نوسلت لانتقال الحرارة من صفيحة شاقولية بالحمل الحر [7]

إن العلاقات السابقة خاصة بالصفيحة الإيزوترمية (T_s) ثابتة)، أمّا إذا كانت حالة سطح ذي تدفق حراري منتظم

الموصلية الحرارية للسائل. من مساواة هذه المعادلة بقانون نيوتن للتبريد [3] نجد:

$$h = \frac{-k \frac{\partial T(x,0,z)}{\partial y}}{T_s - T_\infty} = \left(\frac{-k}{T_s - T_\infty} \right) \left(\frac{\partial T(x,0,z)}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ولتطوير المعادلة لتصبح ملائمة للقياسات (حيث سيُقاسُ تدرج درجات الحرارة) لا بدّ في البداية من تقدير فاصلة الحساسات (أي المسافة الفاصلة بين الحساسات المتتالية باتجاه y). ويجري ذلك بتحديد أصغر مسافة يمكن عدّها مناسبة لتحسس درجات الحرارة. مع الأخذ بالحسبان عدم وجود تغير بدرجات الحرارة بالاتجاه z ، تتحول المعادلة (1) إلى الشكل:

$$h = \left(\frac{-k}{T_s - T_\infty} \right) \left(\frac{T_i - T_{i+1}}{y_{i+1} - y_i} \right) \quad (2)$$

إذ: T_i درجة الحرارة عند الموضع y_i ، و T_{i+1} درجة الحرارة عند الموضع y_{i+1} .

وباعتبارنا نريد حساب h الموضعية عند السطح مباشرة يكون $y_i = 0$ و $y_{i+1} = y$ و $T_i = T_s$ و $T_{i+1} = T_1$ أي:

$$h = \left(\frac{-k}{y} \right) \left(\frac{T_s - T_1}{T_s - T_\infty} \right) \quad (3)$$

تتلخص العلاقات التجريبية المناسبة لمعظم الحسابات الهندسية التي تم الحصول عليها في المعادلات الآتية:

$$\bar{Nu}_L = \frac{\bar{h} \cdot L}{k} = C \cdot Ra_L^n \quad (4)$$

إذ عدد راييلي هو

$$Ra_{x,c} = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \quad (5)$$

البعد المميز في هذه العلاقة (L). نموذجياً، $n=1/4, 1/3$ للجريانات الصفائحية والمضطربة بالترتيب. للجريانات المضطربة تكون \bar{h}_L مستقلة عن L . إذ تحدد الخصائص كلّها عند درجة حرارة الطبقة الحدية الحرارية $(T_f = (T_s + T_\infty)/2)$.

المرئية الأخرى. تتضمن الموصلية دمج تأثير الإشعاع والحمل والتوصيل وتعرف بالمعادلة:

$$h = h_r + h_c \quad (9)$$

إذ h_r المركبة الإشعاعية و h_c المركبة الحملية والتوصيلية بآن معاً. ولاحقاً سنتطرق لخوارزميات هذه المركبات. إن الخوارزميات المقدمة هنا للحساب العملي لموصلية السطح مستخدمة ضمن البرامج الملحقة بجهاز القياس، ويمكن كذلك تقدير الموصلية الحرارية لسطح من القيم المنشورة أو من خوارزميات حسابية أخرى مع ملاحظة درجات حرارة السطح المنخفضة أو العالية عند الرجوع لتلك القيم.

3. 1. 1. المركبة الحرارية الإشعاعية

وهي بكل بساطة تعتمد على انتقال الحرارة بالإشعاع وتحسب من قانون Stefan-Boltzmann مقسمة على متوسط فرق درجات الحرارة بين السطح والهواء [4]. وبكلمات أخرى:

$$h_r = \frac{\sigma \epsilon (T_s^4 - T_o^4)}{T_s - T_o} \quad \text{or}$$

$$h_r = \sigma \epsilon \cdot (T_s^3 + T_s^2 T_o + T_s T_o^2 + T_o^3) \quad \text{or} \quad (10)$$

$$h_r = \sigma \epsilon \cdot 4T_m^3 \left[1 + \left(\frac{T_s - T_o}{T_s + T_o} \right)^2 \right]$$

$$T_m = (T_s + T_o)/2$$

إذ

ϵ [لا بعدي]: الابتعاث الحراري بين السطح الخارجي والوسط المحيط به.

σ [$W/(m^2 \cdot K^4)$]: ثابت Stefan-Boltzman ويساوي إلى $5.66973 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$

T_s [K]: درجة الحرارة المطلقة للسطح.

T_o [K]: درجة الحرارة المطلقة للعناصر المحيطة بالسطح.

3. 1. 2. الانتقال الحراري بالحمل:

لحساب هذه المركبة يجب تحديد شروط معينة وهي - شكل السطح (مستوي، اسطوانة، كرة) - توجيه السطح (من الشاقولي وحتى الأفقي متضمنة تبعية الجريان) - طبيعة

(q_s ثابتة) فإن الفارق في درجات الحرارة ($T_s - T_o$) سيتغير تبعاً لـ x متزايداً من الصفر عند الحافة. اعتماداً على النتائج المقدمة من قبل [3-7]، يمكن اعتماد إجراء تقريبي لتحديد تغير درجات الحرارة على طول السطح. كما أظهرت إمكانية استخدام علاقات Nu_L الموجودة للسطح الإيزونيرمي للحصول على تقريب ممتاز وذلك بحساب Nu_L و Ra_L للفارق في درجات الحرارة عند منتصف الصفحة $\Delta T_{L/2} = T_s(L/2) - T_o$. بهذا ومع $\bar{h} = \frac{q_s}{\Delta T_{L/2}}$ يمكن استخدام معادلة كالمعادلة (7)

(بالتقريب المتتالي) لتحديد $\Delta T_{L/2}$ ، ومنها درجة حرارة منتصف السطح $T_s(L/2)$. ويفرض أن $Nu_x \propto Ra_x^{1/4}$ لكامل الصفحة [3]، فإن هذا يؤدي إلى $\frac{q_s x}{k \Delta T} \propto \Delta T^{1/4} x^{3/4}$ أو $\Delta T \propto x^{1/5}$ ، مما يعني أن

الفارق في درجات الحرارة عند أي x هو

$$\Delta T_x \approx \frac{x^{1/5}}{(L/2)^{1/5}} \Delta T_{L/2} = 1.15 \left(\frac{x}{L} \right)^{1/5} \Delta T_{L/2} \quad (8)$$

من الممكن أيضاً تطبيق العلاقات السابقة على اسطوانة شاقولية بارتفاع L إذا كانت سماكة الطبقة الحدية δ أقل بكثير من قطر الاسطوانة D . وهذه الحالة يمكن أن توافق

$$\text{الشرط} \quad \frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}}$$

3. المعادلات المرجعية المستخدمة في حساب معاملات انتقال الحرارة بالحمل الحر:

بينت المعادلات المرجعية كيفية حساب معاملات انتقال الحرارة بالحمل الحر وغيرها. وهي كما يأتي:

3. 1. الانتقال الحراري من السطح:

يفترض لحالة الانتقال الحراري للسطح h كما هي معرفة بالمرجع ASTM2006-C186 [4]، أن يكون السطح ذا درجة حرارة ثابتة، والسائل المحيط به وكذلك السطح

β : عامل التمدد الحراري الحجمي للوسط المحيط K^{-1}
 ρ : كثافة الوسط المحيط (kg/m^3)

ΔT : فرق درجات الحرارة بين الوسط المحيط والسطح K
وهنا يجب ملاحظة أن حساب قيم بارامترات السائل يكون عند درجة حرارة الطبقة الرقيقة الملاصقة للسطح T_f ، وهي متوسط درجات الحرارة للسطح والوسط المحيط. عند تعرض السطح لجريان سائل فإن انتقال الحرارة الحلمي سيكون مزيجاً من الحمل القسري والحر. أوصى Churchill [12] بالعلاقات العددية الآتية: إذ يُحسب متوسط عدد نوسلت لكل شكل هندسي بالاتجاهات جميعها لحالتي الحمل القسري والحمل الحر من علاقة الحساب العددي:

$$(\overline{Nu} - \delta \dot{y}) = (\overline{Nu}_f - \delta \dot{y}) + (\overline{Nu}_n - \delta \dot{y}) \quad (11)$$

إذ تتبع المركبة الزمنية z والثابت المكاني δ لنوع السطح وتوجيهه. وبعد حساب عدد نوسلت يُحسب معامل انتقال الحرارة من العلاقة:

$$h_c = \overline{Nu}_L \cdot k_f / L \quad (12)$$

$$\overline{h}_c = \overline{Nu}_D \cdot k_f / D$$

إذ L و D خصائص البعد للنظام. والحد k_f الموصلية الحرارية للهواء، وتحدد عند درجة حرارة الطبقة الملاصقة للسطح.

3. 2. معامل انتقال الحرارة بالحمل للسطوح المستوية:

تعطى علاقة الحمل الحراري القسري للجريان الصفائحي على سطوح مستوية ايزوتيرمية Churchill and Ozoe [13]:

$$\overline{Nu}_{f,L} = \frac{0.6774 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.0468 / Pr)^{2/3}]^{1/4}} \quad (13)$$

$Re_L < 5 \times 10^5$

الجريان الحراري ضمن السائل (من الحمل الحر وحتى القسري مع تغير اتجاه جريان السائل وسرعته) - حالة السطح (من سطح ناعم وحتى درجات خشونة متعددة وهي مهمة بشكل أساسي في الحمل القسري) يمكن إعادة صياغة علاقات انتقال الحرارة باستخدام الأعداد اللابعديّة الآتية:

عدد نوسلت

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}_c L}{k_f} \quad \text{or} \quad \overline{Nu}_D = \frac{\overline{h}_c D}{k_f}$$

عدد رابلي

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho \cdot c_p (\Delta T) L^3}{\nu \cdot k_f}$$

$$\text{or} \quad Ra_D = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho \cdot c_p (\Delta T) D^3}{\nu \cdot k_f}$$

عدد رينولدز

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} \quad \text{or} \quad Re_D = \frac{VD}{\nu}$$

عدد برنلد

$$Pr = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{k_f}$$

إذ:

$L [m]$: البعد المميز للسطوح المستوية الشاقولية والأفقية والاسطوانات الشاقولية. وبالعوموم هي ارتفاع السطوح الشاقولية أو طول السطوح الأفقية.

$D [m]$: البعد المميز وهو القطر للأسطوانات الأفقية والكرات.

C_p : الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت للسائل المحيط بالسطح $J/(kg \cdot K)$

h_c : عامل انتقال الحرارة الحلمي $W/(m^2 \cdot K)$

k_f : الموصلية الحرارية للسائل $W/(m \cdot K)$

V : سرعة التيار غير المشوش للوسط المحيط m/s

ν : اللزوجة الحركية للوسط المحيط m^2/s

g : تسارع الجاذبية الأرضية m/s^2

يكون البعد المميز في حالة السطوح الأفقية المستوية حاصل قسمة مساحة السطح على محيطه المبلل. ولحساب عدد نوسلت برمجياً تؤخذ $j=3.5$ و $\delta=0$.
4. الجهاز المستخدم:
4.1. وصف الجهاز
 يتألف الجهاز من العناصر كما في الشكل (3):



الشكل (3) واجهة الجهاز (وحدة الإظهار ولوحة المفاتيح)

- 1- وحدة إظهار LCD.
- 2- لوحة مفاتيح.
- 3- ثمانية حساسات حرارية (NTC)، كل منها موصول في تشكيلة جسرية [9].
- 4- المعالج الصغري Atmega16، الذي يقوم بما يأتي:
 - a. قراءة قيم المبدل التماثلي الرقمي وحساب قيمة الثابت H.
 - b. التخاطب مع الحاسب وفق المعيار RS232.
 - c. مسح لوحة المفاتيح.
 - d. قيادة وحدة إظهار LCD.
 - e. قيادة الناخب التماثلي وذلك لمسح الحساسات الثمانية.

واقترح *Incropera and Dewitt* [3] للحمل القسري لجريان مضطرب فوق سطح مستوي إيزوتيرمي العلاقة الآتية:

$$\overline{Nu}_{fL} = (0.037 Re_L^{4/5} - 871) Pr^{1/3} \quad (14)$$

$$5 \times 10^5 < Re_L < 10^8$$

يجب ملاحظة أن الحد الأعلى لـ Re_L قيمة تقريبية ويجب الانتباه لذلك عند استخدام هذه المعادلة كما اقترحت العلاقات الآتية للحمل الحر على سطوح شاقولية مستوية من قبل *Churchill and Chu* [11]:

$$\overline{Nu}_{nL} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{4/27}} \right\}^2$$

$$Ra_L \text{ كامل مجال} \quad (15)$$

ولمزيد من الدقة للمجال الصفائحي اقترحت العلاقة الآتية في المرجع نفسه:

$$\overline{Nu}_{nL} = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$Ra_L < 10^9$$

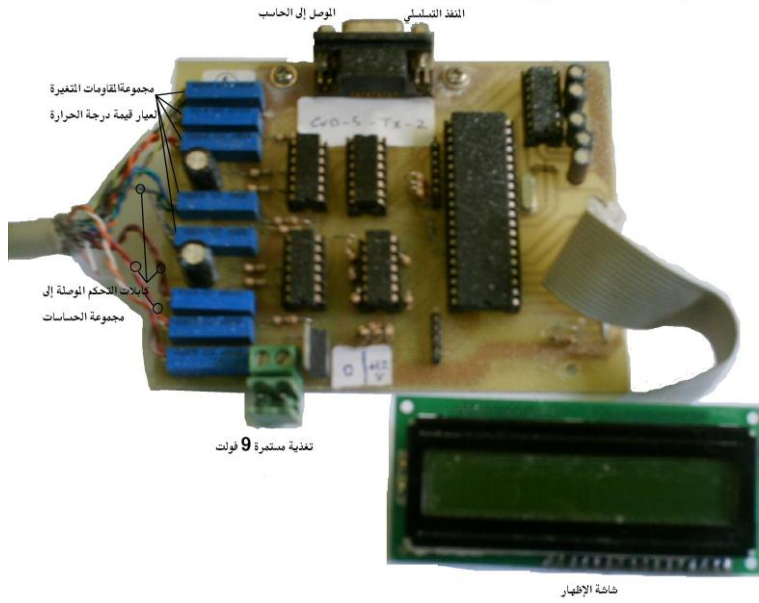
ويكون الارتفاع الشاقولي هو خاصة البعد المميز لحالة السطوح الشاقولية. ولحساب عدد نوسلت الكلي برمجياً يمكن وضع $j=3$ و $\delta=0$. كذلك من المهم ملاحظة أنه يمكن تطبيق علاقات الحمل الحر على الاسطوانات الشاقولية في معظم الحالات.
 كما قدم *Incropera and Dewitt* [3] لحالة الحمل الحر للسطوح الأفقية المستوية العلاقات الآتية:
 . جريان حراري للأعلى

$$\overline{Nu}_{nL} = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad 10^4 < Ra_L < 10^7 \quad (16)$$

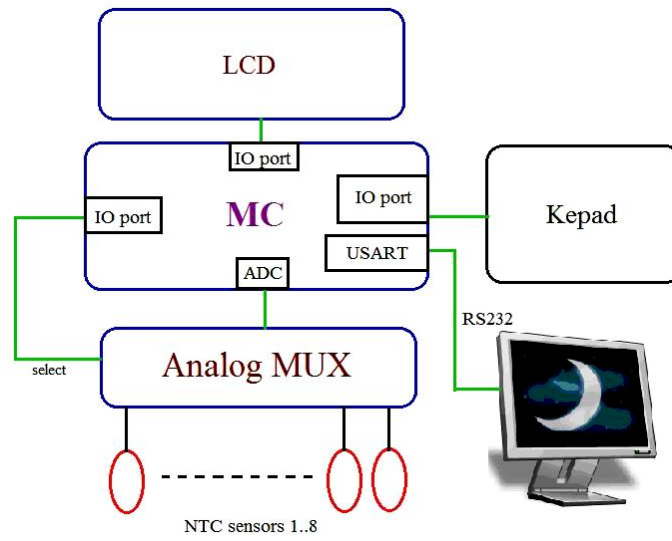
$$\overline{Nu}_{nL} = 0.15 Ra_L^{1/3} \quad 10^7 < Ra_L < 10^{11}$$

. جريان حراري للأسفل

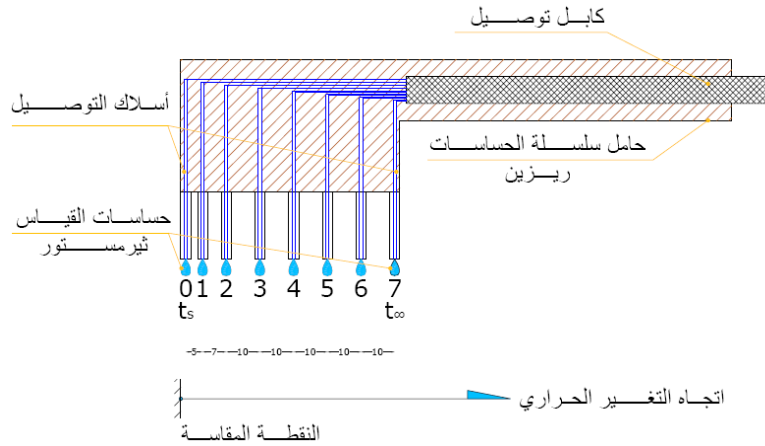
$$\overline{Nu}_{nL} = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad 10^5 < Ra_L < 10^{10} \quad (17)$$



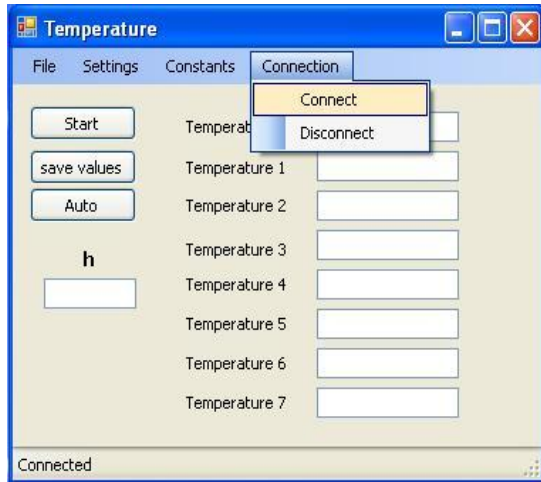
الشكل (4) الدارة الإلكترونية للجهاز



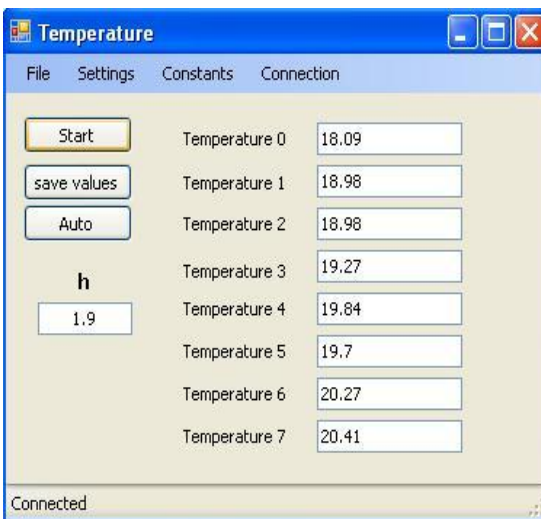
الشكل (5) المخطط الصندوقي للجهاز



الشكل (6) مصفوفة الحساسات (طريقة قياس التدرج في درجات الحرارة)



الشكل (7) إنشاء اتصال مع الجهاز



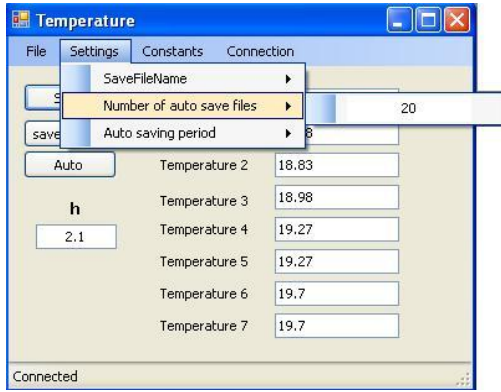
الشكل (8) الضغط على زر (start) ليقرأ البرنامج القيم من الجهاز

4.2. برنامج معالجة القيم المقاسة من الجهاز:

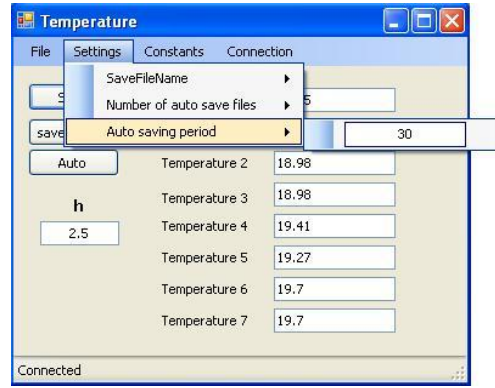
يقسم هذا البرنامج إلى قسمين رئيسيين:

4.2.1. برنامج القراءة من الجهاز وتسجيل البيانات:

يعمل هذا البرنامج بقيادة الجهاز في قراءة قيم درجات الحرارة للحساسات الثمانية وتسجيلها ضمن خاناتها بالترتيب. كذلك يعمل على حساب عامل انتقال الحرارة وفق العلاقة (3) كما هو الحال ضمن الجهاز بحد ذاته. ثم يقوم هذا البرنامج وعند الضغط على (save) بحفظ البيانات المقروءة وكذلك قيمة h المحسوبة من هذه القيم. ويمكن فيه تعديل المسافة بين الحساسات المعنية بالقياس وكذلك عامل الانتقال الحراري بالتوصيل للسائل (الهواء) الذي يجري قياس عامل انتقال الحرارة بالحمل له. يبين الشكل (7) طريقة إنشاء اتصال مع الجهاز، والشكل (8) بدء تسجيل القراءات بعد تعيين قيمة عامل التوصيل الحراري وقيم المسافات بين الحساسات كما في الشكل (9).



الشكل (11) تحديد عدد القراءات للنقطة المقيسة

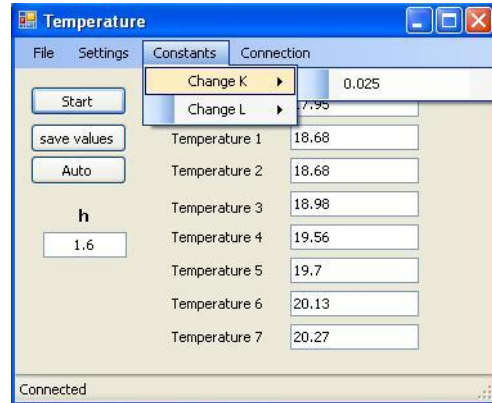


الشكل (12) تحديد الزمن بين القراءات (بالثانية)

4. 2. 2. برنامج معالجة البيانات المقروءة ورسم المنحنيات:

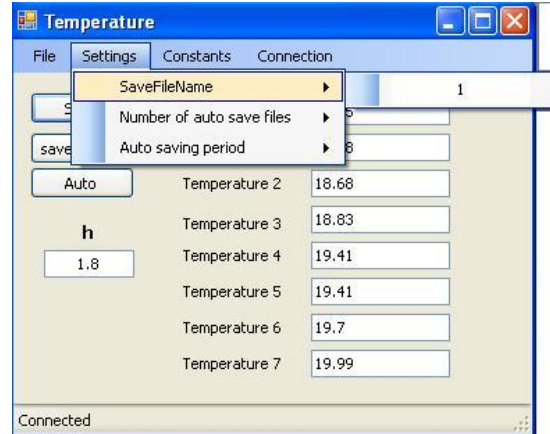
بعد تسجيل القراءات المطلوبة لمجموعة النقاط المقيسة (لحالتنا عشر نقاط المقيسة قراءة كل منها 20 مرة) تُعالج البيانات المحفوظة عن طريق فتح أي ملف من الملفات المحفوظة سابقاً ومعالجتها وإيجاد استيفاء المربعات الصغرى فيها لمنحنى من الدرجة الخامسة. كذلك استيفاء هذه القيم المقيسة بمنحنى من الشكل $(t = a - e^{bx})$ الممثل للشكل العام لتبريد أي سطح شاقولي. وأخذ معدل مجموع القراءات وحساب الأخطاء لهذه القراءات وفق علاقات حساب الأخطاء المعروفة.

نقل البرنامج فتظهر النافذة في الشكل (13)



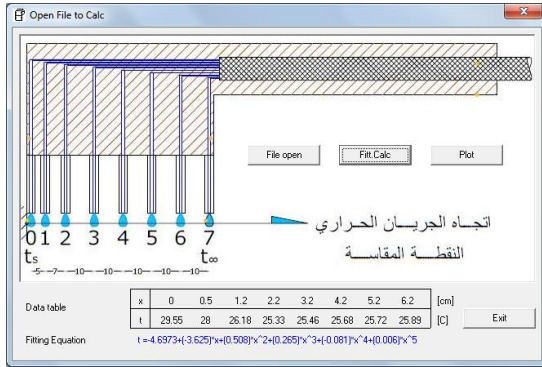
الشكل (9) تحديد قيم k عامل التوصيل للهواء وكذلك المسافة بين الحساسات المعنية

يُحدّد اسم ملف القراءة (القياس الموضوعي) كما في الشكل (10). أو من الممكن أخذ عدد من القراءات المتتالية بفارق زمني معين للنقطة نفسها للحصول على دقة أكبر في القياس، فيحدّد عدد القراءات المطلوبة كما في الشكل (11)



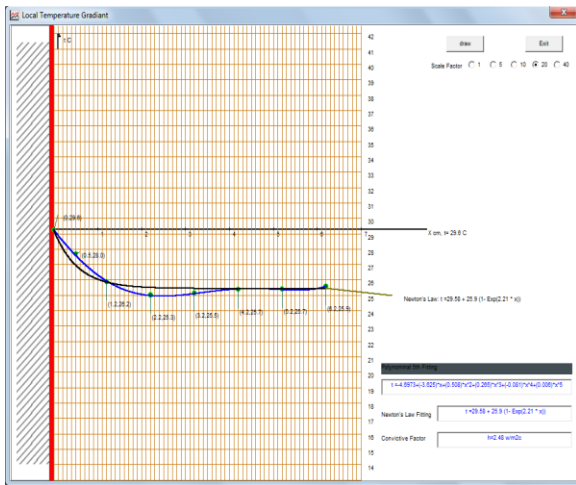
الشكل (10) تحديد اسم مجموعة الملفات المراد قراءتها (اسم النقطة المقيسة)

والفاصل الزمني بين القراءات كما في الشكل (12) ثم الضغط على زر (Auto) لحفظ مجموعة القياسات المتتالية لنقطة قياس واحدة.



الشكل (15) ظهور معادلة الاستيفاء من الدرجة الخامسة

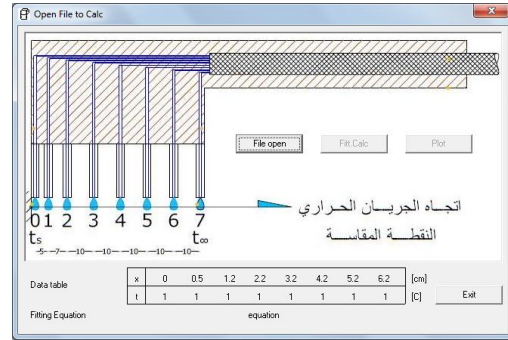
لرسم تدرج درجات الحرارة واستيفائه نضغط الزر *plot* فتفتح النافذة الخاصة بالطباعة. نحدد فيها مقياس الطباعة المراد ونضغط الزر (*draw*) فنرسم التوزيع الحراري لنقطة القياس تلك مع استيفاءاتها من الدرجة الخامسة، وكذلك استيفاءها بقانون نيوتن للتبريد. كما تظهر قيمة عامل انتقال الحرارة بالحمل لتلك النقطة.



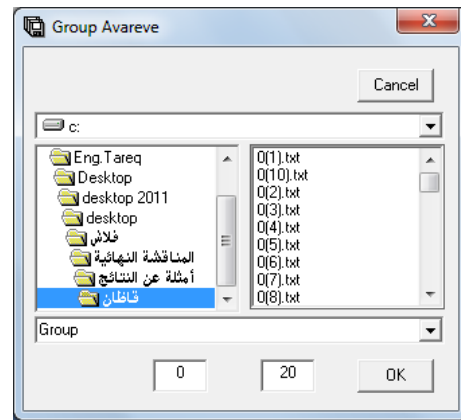
الشكل (16) التوزيع الحراري ومعادلات الاستيفاء لنقطة قياس معينة

5. التجربة (الحالة المدروسة اسطوانة شاقولية):

أُجريت التجربة على اسطوانة شاقولية بقطر خارجي 38.5 cm وارتفاع 112 cm . وحُوفِظَ على درجة حرارة ثابتة للأسطوانة عن طريق تيرموستات يتحكم بسخان كهربائي لتسخين الماء داخل الاسطوانة. فتم تثبيت درجة حرارة الماء ضمن الاسطوانة على $40\text{ }^\circ\text{C}$. بتطبيق الفرضيات الأساسية وبعتماد 10 نقاط لقياس عامل انتقال الحرارة

الشكل (13) فتح الملف المطلوب حسابه بالضغط على *File Open*

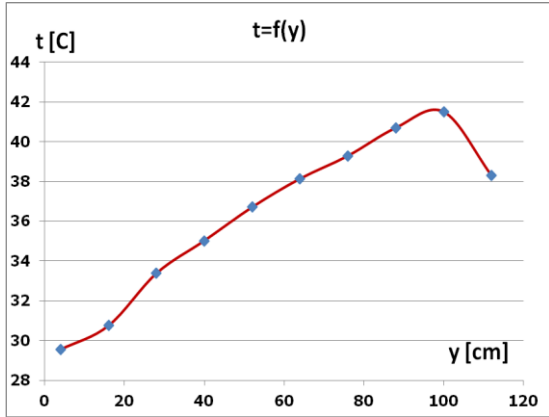
نختار الأمر *FileOpen* فتفتح نافذة الاستعراض. وفيها نختار موقع الملف المراد تحليله، أو نختار متوسط مجموعة من القراءات فنختار *Add/Av* لكل ملف نختاره، ثم نضغط على *OK* ونحفظ اسم ملف معدل النتائج وأخطاء القياس وعدم الدقة في القراءات لهذه النقطة. كما يمكن اختيار مجموعة تكرار قياس لنقطة مقيسة عن طريق الضغط على *G.Open*.



الشكل (14) نافذة الاستعراض لقراءة ملفات النقاط المقيسة

نعود بعدها للنافذة الأولى للبرنامج ونختار *Fit.calc* لحساب استيفاء الدرجة الخامسة لمنحنى نقاط القياس الثماني. وتظهر معادلة الاستيفاء في المكان *equation*.

الشكل (17) توزع نقاط قياس درجة الحرارة على الاسطوانة الشاقولية.

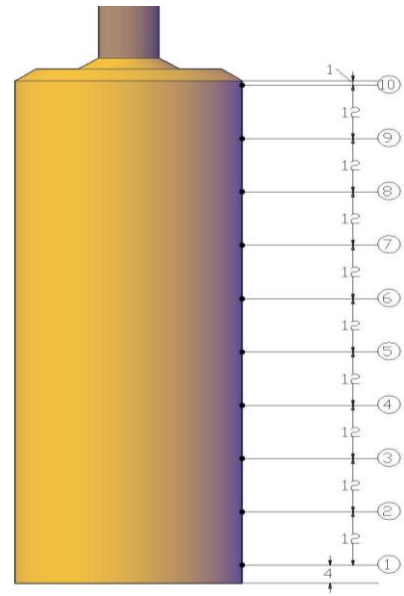


الشكل (18) تغير درجة حرارة سطح الاسطوانة كتابع للارتفاع

موزعة كما بالشكل (17). تستخدم لكل نقطة قياس مصفوفة الحساسات الثمانية باتجاه x عامودي على السطح (لقياس تدرج درجات الحرارة). كُزِرَ القياس لكل نقطة من النقاط 20 مرة بفارق زمني بين القراءات 15 Sec. وكانت القيم الناتجة عن البرنامج بعد أخذ الـ 20 قراءة بالحسبان كما هي مبينة بالجدول (1). إذ يبيّن السطر الأول نقطة القياس (10 نقاط)، إذ تشكل كل نقطة قياس 8 قياسات آنية لدرجة حرارة النقطة مكررة لـ 20، وتكون القيمة المسجلة في الجدول هي معدل عدد هذه القراءات.

6. النتائج:

نظراً إلى أن الحساس ذا الرقم 1 يقيس درجة حرارة النقاط المختلفة من سطح الاسطوانة، نلاحظ أن سطح الاسطوانة لم يكن إيزوتيرمياً خلال التجربة. وكان منحنى توزع درجة الحرارة على طول الارتفاع y كما في الشكل (18).



الجدول (1) القيم الناتجة عن برنامج معالجة البيانات المقيسة للاسطوانة الشاقولية

النقطة		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
حساس 1	t0 [°C]	29.55	30.75	33.38	35.02	36.71	38.14	39.29	40.7	41.51	38.31
حساس 2	t1 [°C]	28	28.85	29.03	29.06	29.83	29.64	29.32	32.78	32.6	30.62
حساس 3	t2 [°C]	26.18	26.77	26.91	26.94	27.59	27.39	27.34	29.45	29.65	28.63
حساس 4	t3 [°C]	25.33	25.89	25.86	26	26.47	22.67	25.56	27.48	27.77	27.43
حساس 5	t4 [°C]	25.46	25.82	25.7	25.84	26.33	26.15	26.36	26.96	27.24	27.15

حساس 6	t5 [°C]	25.68	25.96	25.72	25.9	26.24	26.29	26.43	26.69	27.07	27.05
حساس 7	t6 [°C]	25.72	25.95	25.59	25.72	26.19	26.31	26.28	26.4	26.89	26.91
حساس 8	t7 [°C]	25.89	26.02	25.7	25.85	26.29	26.43	26.33	26.42	26.84	26.9
انحراف 1	□(0)	0.103	0.117	0.318	0.722	0.474	0.287	0.334	0.284	0.282	0.44
انحراف 2	□(1)	0.231	0.159	0.36	0.224	0.211	0.412	0.74	1)= 1	0.49	0.495
انحراف 3	□(2)	0.099	0.088	0.145	0.082	0.081	0.216	0.377	0.251	0.388	0.24
انحراف 4	□(3)	0.064	0.079	0.193	0.118	0.148	7.559	0.082	0.152	0.235	0.126
انحراف 5	□(4)	0.064	0.103	0.13	0.116	0.116	0.164	0.159	0.15	0.105	0.087
انحراف 6	□(5)	0.064	0.059	0.083	0.087	0.094	0.166	0.176	0.137	0.065	0.06
انحراف 7	□(6)	0.161	0.083	0.113	0.083	0.117	0.098	0.19	0.152	0.124	0.093
انحراف 8	□(7)	0.126	0.068	0.103	0.081	0.109	0.158	0.253	0.134	0.064	0.104
انحراف عام 1	□(0)t	0.033	0.037	0.101	0.228	0.15	0.091	0.105	0.09	0.089	0.139
انحراف عام 2	□(1)t	0.073	0.05	0.114	0.071	0.067	0.13	0.234	0.316	0.155	0.157
انحراف عام 3	□(2)t	0.031	0.028	0.046	0.026	0.026	0.068	0.119	0.079	0.123	0.076
انحراف عام 4	□(3)t	0.02	0.025	0.061	0.037	0.047	2.39	0.026	0.048	0.074	0.04
انحراف عام 5	□(4)t	0.02	0.033	0.041	0.037	0.037	0.052	0.05	0.047	0.033	0.028
انحراف عام 6	□(5)t	0.02	0.019	0.026	0.028	0.03	0.053	0.056	0.043	0.021	0.019
انحراف عام 7	□(6)t	0.051	0.026	0.036	0.026	0.037	0.031	0.06	0.048	0.039	0.029
انحراف عام 8	□(7)t	0.04	0.022	0.033	0.026	0.035	0.05	0.08	0.042	0.02	0.033
عدم دقة 1	U(0)	0.124	0.126	0.157	0.258	0.192	0.15	0.16	0.15	0.149	0.184
عدم دقة 2	U(1)	0.14	0.13	0.165	0.139	0.137	0.177	0.263	0.338	0.196	0.197
عدم دقة 3	U(2)	0.124	0.123	0.129	0.123	0.123	0.138	0.169	0.144	0.172	0.142
عدم دقة 4	U(3)	0.122	0.123	0.135	0.126	0.129	2.393	0.123	0.129	0.141	0.126
عدم دقة 5	U(4)	0.122	0.124	0.127	0.125	0.125	0.131	0.13	0.129	0.124	0.123
عدم دقة 6	U(5)	0.122	0.121	0.123	0.123	0.124	0.131	0.132	0.128	0.122	0.121
عدم دقة 7	U(6)	0.13	0.123	0.125	0.123	0.126	0.124	0.134	0.129	0.126	0.124
عدم دقة 8	U(7)	0.126	0.122	0.124	0.123	0.125	0.13	0.144	0.127	0.122	0.124
القيمة المحسوبة	H[w/m ² °C]	2.95	2.89	3.78	4.3	4.36	3.76	4.78	3.67	3.97	4.38
عدم الدقة	Uh[w/m ² °C]	0.99	0.65	0.66	0.51	0.44	0.46	0.35	0.32	0.46	0.33

بتطبيق علاقات نوسلت للحمل الحر المقدمة سابقاً هي كما في الجدول (2).

بينما كان توزيع قيم عامل انتقال الحرارة بالحمل على طول الاسطوانة (بعد استثناء النقطة 6 الشاذة بشكل واضح) كما في الشكل (20).

الجدول (2) قيمة عامل انتقال الحرارة الموافقة للاسطوانة الشاقولية

$L [cm]$	$\bar{t}_L [°C]$	$\bar{t}_i [°C]$
112	36.3	26.15
Ra_L	\overline{Nu}_L	$\bar{h}_r [w/m^2 °C]$
1.33E+09	134.27	3.117

وكان تدرج درجات الحرارة في النقاط العشر المقيسة كل على حدة كما في الشكل (19).

وبعد استيفاء توزيع درجة الحرارة على سطح الاسطوانة (بالاتجاه y) كان من الشكل:

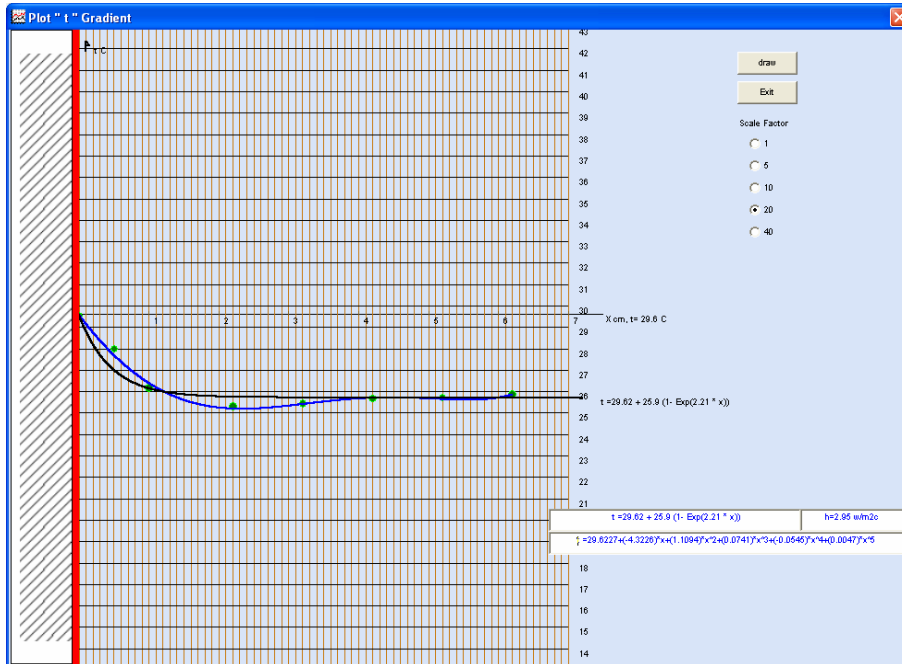
$$t = 27.59 + 0.353 \times y - 0.0085 \times y^2 + 0.00015 \times y^3 - 9.5 \times 10^{-7} \times y^4$$

ويكون $\int_0^{112} t dy = 4063 °C \times cm$ ومن ثم تكون درجة الحرارة

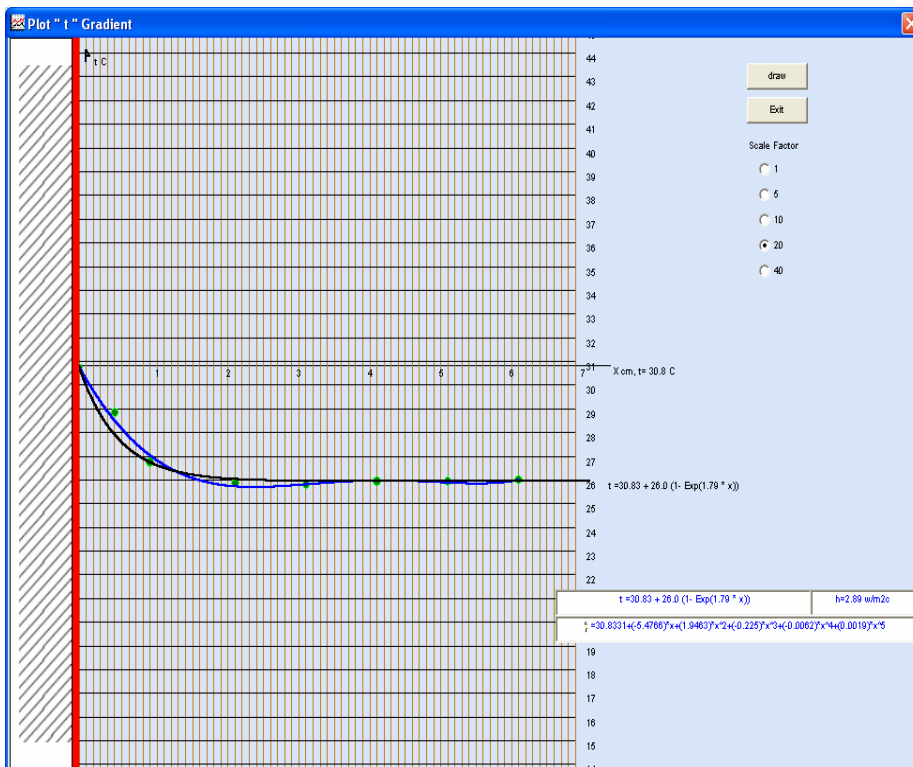
الوسطية لسطح الاسطوانة $\bar{t}_i = \frac{4063}{112} = 36.3 °C$ ودرجة الحرارة

الوسطية للهواء المحيط $\bar{t}_i = 26.15 °C$ المتمثلة بوسطي

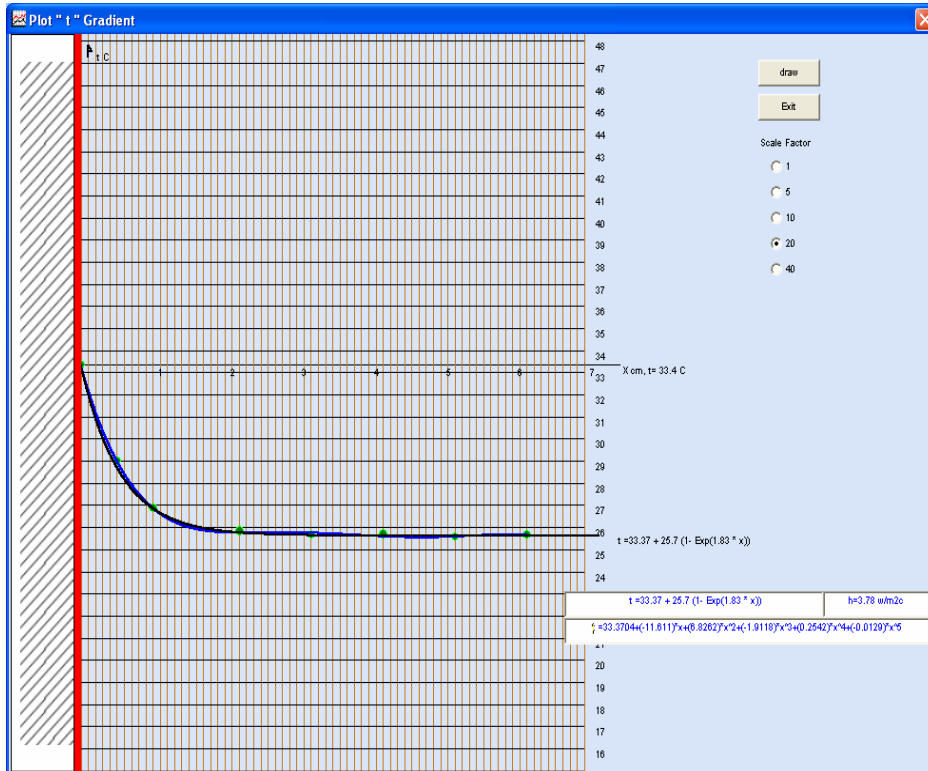
قراءات الحساس رقم 8. ومن ثم تكون قيمة \bar{h}_L الموافقة



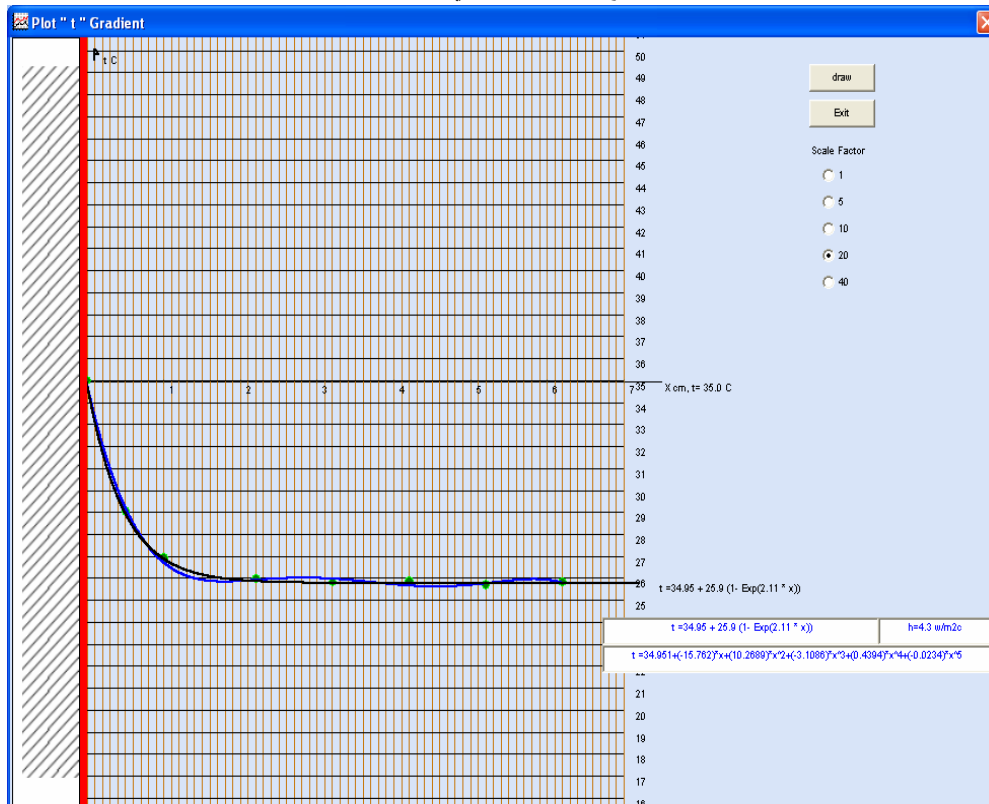
تدرج درجات الحرارة في النقطة 1



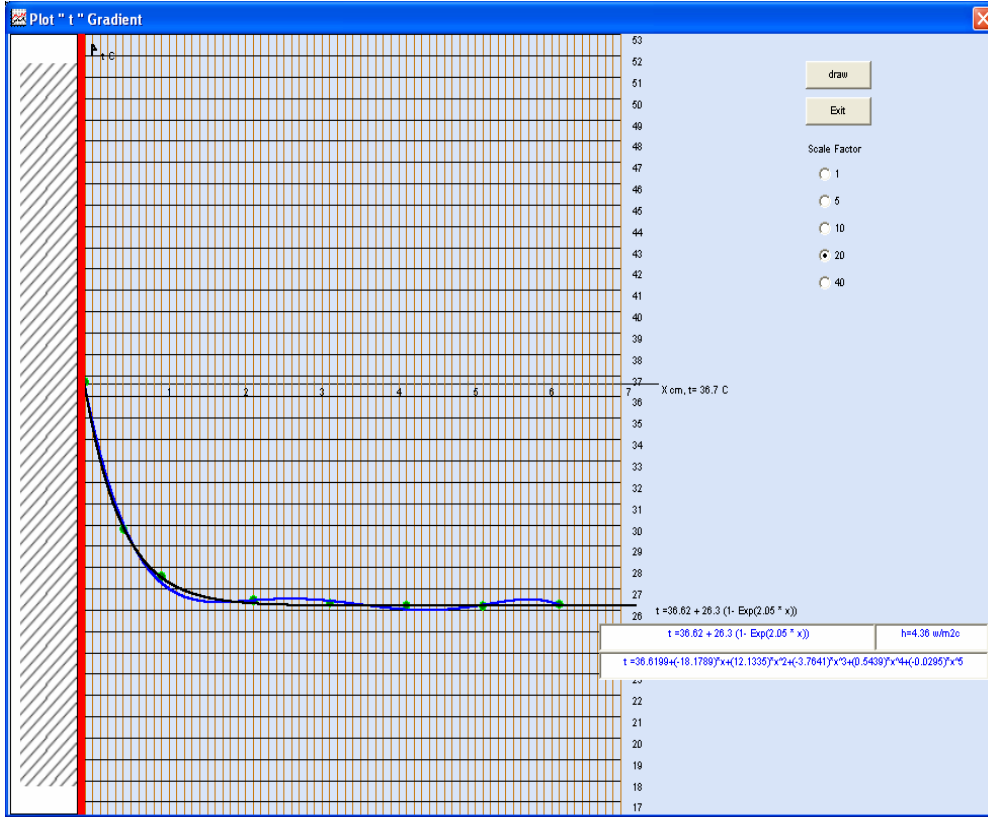
تدرج درجات الحرارة في النقطة 2



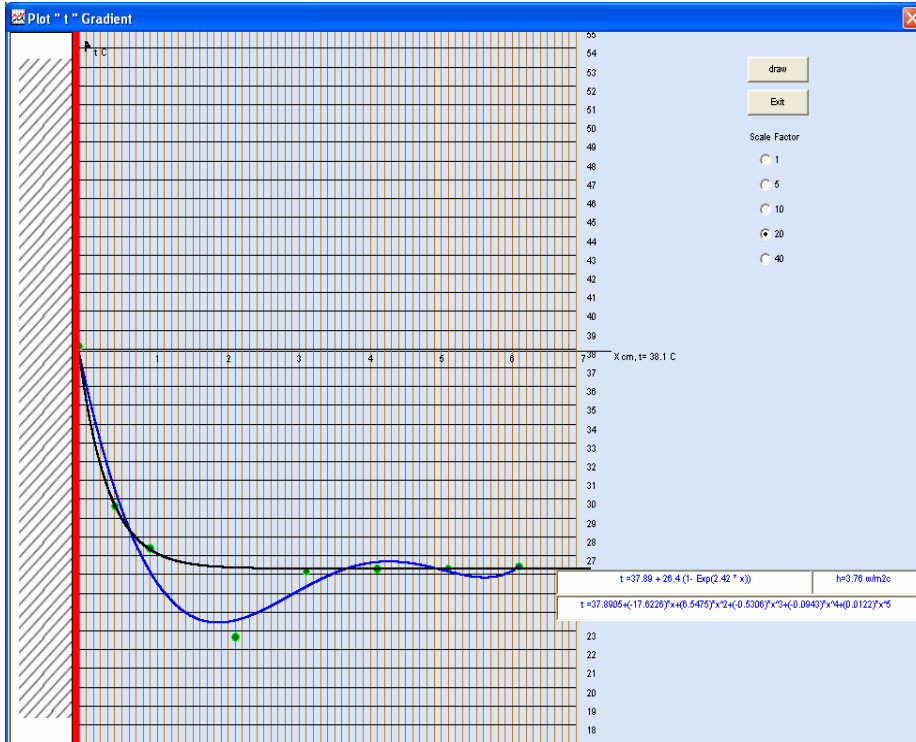
تدرج درجات الحرارة في النقطة 3



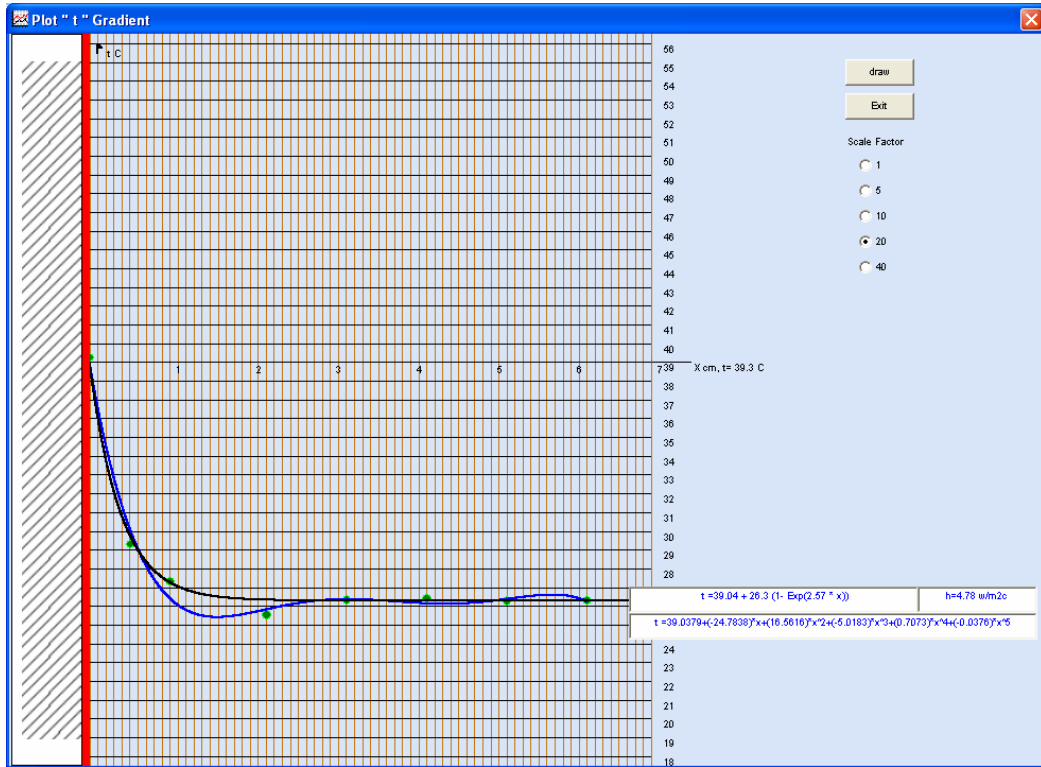
تدرج درجات الحرارة في النقطة 4



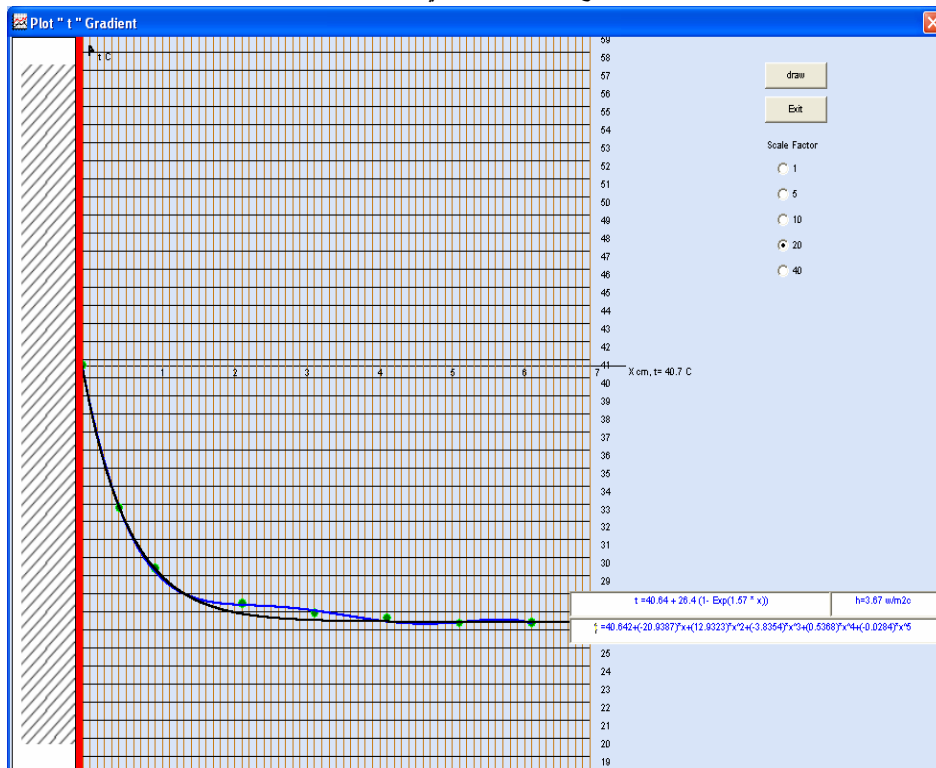
تدرج درجات الحرارة في النقطة 5



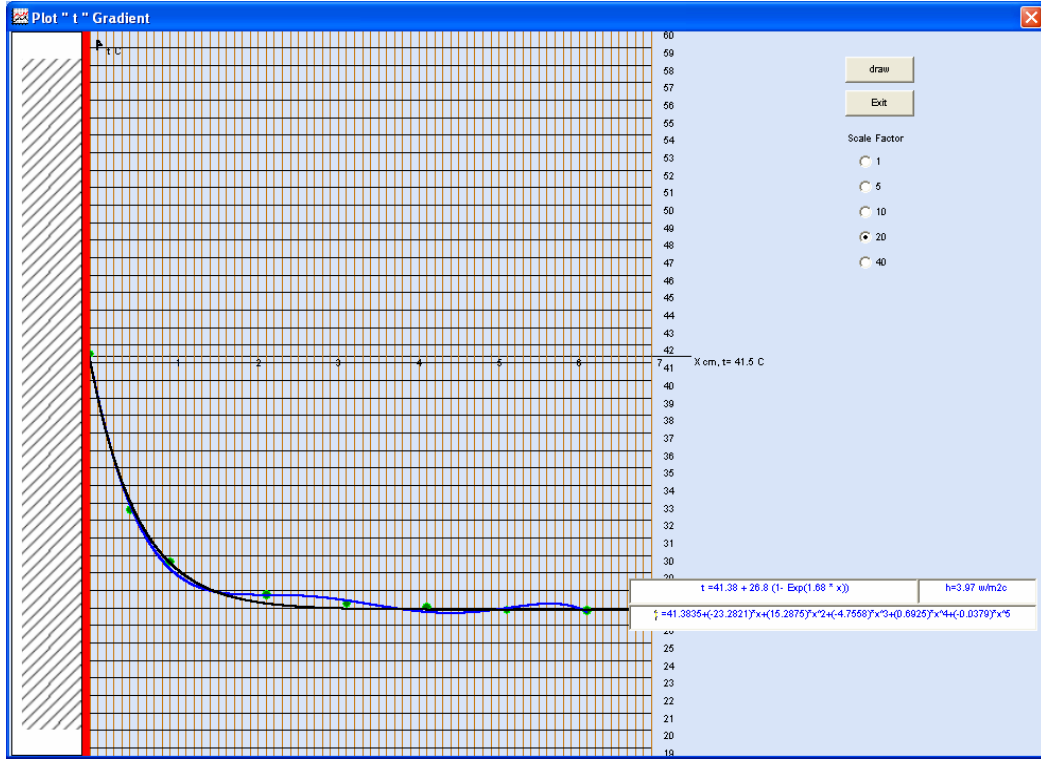
تدرج درجات الحرارة في النقطة 6



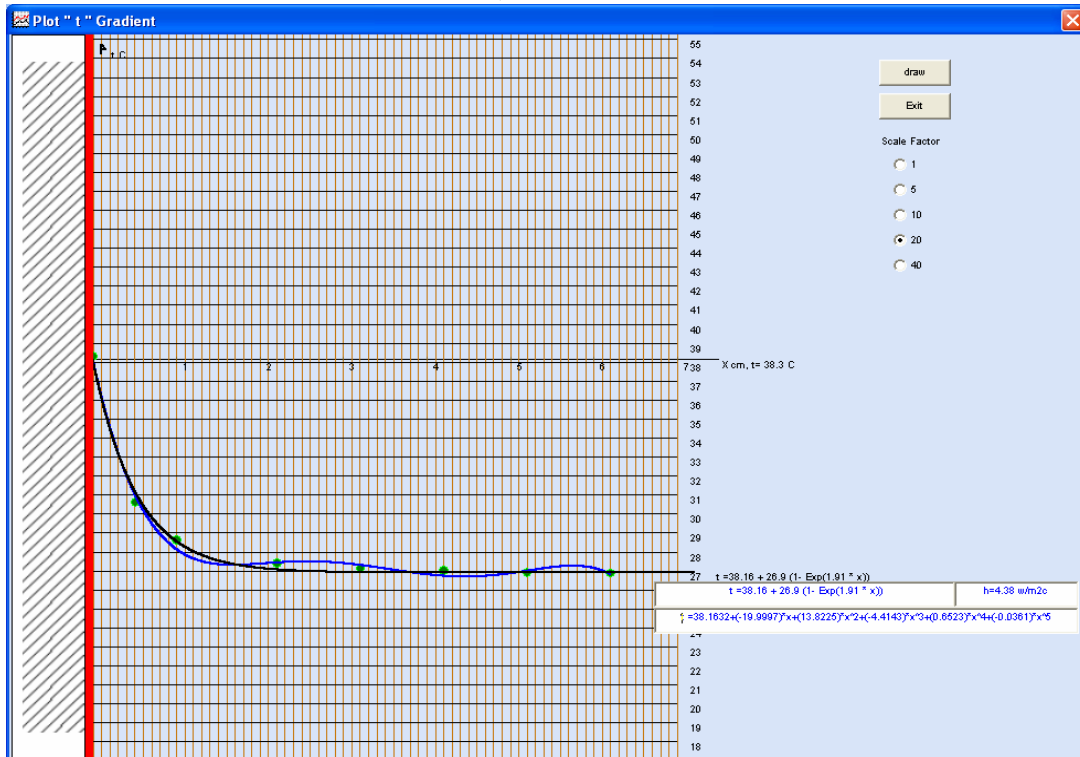
تدرج درجات الحرارة في النقطة 7



تدرج درجات الحرارة في النقطة 8



تدرج درجات الحرارة في النقطة 9



تدرج درجات الحرارة في النقطة 10

الشكل (19) تدرج درجات الحرارة في النقاط المقيسة

السابقة على طول الاسطوانة، وكذلك قيمة درجة حرارة سطح الاسطوانة الوسطية. وبالنتيجة تكون كمية الحرارة المنتقلة بالحمل على طول الاسطوانة:

$$\bar{q}_c = \bar{h}_c \cdot A \cdot (\bar{t}_s - t_{air}) = 3.95 \times 1.35 \times (36.3 - 26.15) \cong 54.12 \text{ W}$$

إذ إن مساحة سطح الاسطوانة المدروس هو $A=1.35 \text{ m}^2$ ، وأضيفت اللاحقة السفلية c إلى معامل انتقال الحرارة بالحمل لتمييزه عن معامل انتقال الحرارة بالإشعاع المحسوب لاحقاً. ويكون التدفق الحراري على طول الاسطوانة بالإشعاع مساوياً:

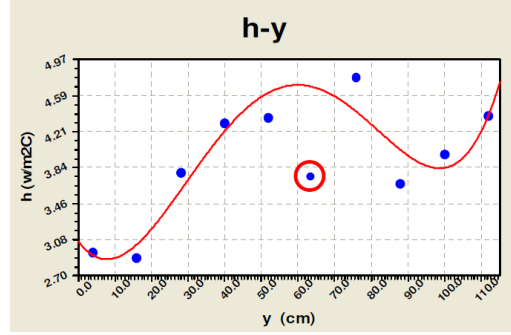
$$\bar{q}_r = \bar{h}_r \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{air}^4) = 6.237 \times 10^{-8} \times 1.35 \times [(36.3 + 273)^4 - (26.15 + 273)^4] \cong 10 \text{ W}$$

مع العلم أن الاسطوانة مصنوعة من الستانلس ستيل اللامع وله $\varepsilon = 0.11$. ومن ثم:

$$\bar{h}_r = \sigma \cdot \varepsilon = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.11 \cong 6.237 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-4}]$$

8. الاستنتاجات:

1. أُجريت القياس التجريبي لانتقال الحرارة بالحمل الحر من اسطوانة منزلية شاقولية، بعد ضبط درجة حرارة الماء داخلها على القيمة $40 [^\circ\text{C}]$ ، وتبين أن درجة حرارة سطحها الخارجي لم يكن إيزوتيرمياً.
2. تبين تقارب القيمة المحسوبة بالقيمة المقاسة لدى مقارنة عامل انتقال الحرارة بالحمل حسابياً مع عامل انتقال الحرارة المقيس.
3. أُجريت ترقية الجريان الحراري الحلمي من الاسطوانة باتجاه الهواء المحيط بها عن طريق إظهار المجال الحراري المجاور للاسطوانة في النقاط العشر المقاسة والمبينة بالشكل (19).



الشكل (20) منحنى استيفاء قيم h كتابع للارتفاع y

7. المناقشة

نلاحظ أن توزيع قيم h غير خطي (الشكل (20))، كذلك ولا يتجه باتجاه واحد. فهو متناقص حتى ارتفاع معين (نقطة القياس 2)، ثم متزايد حتى نقطة القياس 7، ثم متناقص. وهذا التوزيع منطقي. فبعد النقطة 10 تغير اتجاه السطح المقيس من شاقولي إلى أفقي؛ مما يؤثر في شكل الجريان الحراري ومنه في قيمة عامل الانتقال الحراري. كذلك الأمر بالنسبة إلى النقطة 1 إذ لا يوجد قبلها ماء ساخن داخل الاسطوانة؛ مما يؤثر أيضاً في شكل المجال الحراري. فلا ننسى أن قيمة h تابعة لفرق درجات الحرارة بين السطح والهواء كما هي تابعة للخصائص الفيزيولوجية للهواء أيضاً. إن استيفاء قيم h بمعادلة من الدرجة الخامسة هو من الشكل:

$$h = 3.063 - 0.052 \times y + 0.004 \times y^2 - 6.06 \times 10^{-5} y^3 + 2.28 \times 10^{-7} \times y^4 - 2.9 \times 10^{-10} \times y^5$$

$$\text{كون } \int_0^{112} h dy = 443.76 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C.cm} \text{ ومن ثم}$$

يكون عامل الانتقال الحراري الوسطي بالحمل

$$\bar{h} = \frac{443.76}{112} = 3.95 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ هو}$$

ونلاحظ تقارب القيمة المقاسة $\bar{h} = 3.95 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ مع القيمة المحسوبة وفق العلاقات المقدمة من قبل [4]

$$\text{وهي } \bar{h}_L = 3.117 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

يمكن حساب التدفق الحراري على طول الاسطوانة عملياً باستخدام قيمة h الوسطية المحسوبة بنتيجة المكاملة

*
المراجع

- [1]. ASHRAE 2009 Handbook of Fundamentals, SI_F09_Ch04, "HEAT TRANSFER," American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA.
- [2]. Latif M. Jiji, Heat Convection, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [3]. Incropera, Fundamentals of Heat and Mass Transfer- 6th, free convection, Introduction to heat Transfer 2006.
- [4]. ASTM C680 Standard Practice for Estimate of the Heat Gain or Loss and the Surface Temperatures of Insulated Flat, Cylindrical, and Spherical Systems by Use of Computer Programs, 2008.
- [5]. Introduction to Thermal Systems Engineering
- [6]. Correlations for Convective heat transfer.
- [7]. Heat Transfer Handbook_Bejan_Wiley_2003
- [8]. Churchill, S. W., and Chu, H. H. S., "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol 18, 1975, pp. 1323-1329.
- [9]. Measurement instrumentation sensors
- [10]. Ostrach, S., "Natural Convection in Enclosures." In J P. Hartnett and T. F. Irvine, Eds., Advances in Heat Transfer, Vol. 8, Academic Press, New York.1972. pp. 161-227.
- [11]. Churchill, S. W., and H. H. S. Chu, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder," Int. J. Heat Mass Transfer, 18, 1049, 1975.
- [12]. Churchill, S. W., "Combined Free and Forced Convection in Channels," in E. U. Schlinder, Ed.-in-Chief, Heat Exchanger Design Handbook, Section 2.5.10, Hemisphere Publishing, New York, 1983.
- [13]. Churchill, S. W., and Ozoe, H., "Correlations for Laminar Forced Convection in Flow over an Isothermal Flat Plate and in Developing and Fully Developed Flow in an Isothermal Tube," J.Heat Transfer, Vol 95, 1973, p. 78